

Е.А. Арсирий, С.Г. Антощук, В.А. Арсирий, А.И. Гуда

Система поддержки принятия решений по повышению эффективности гидроаэродинамических процессов во вспомогательных элементах энергетических агрегатов

Разработана распределенная проблемно-ориентированная система поддержки принятия решений, основанная на соответствующих информационных технологиях при проведении комплексных мониторинга и моделирования состояния гидроаэродинамических процессов в энергетических агрегатах, их вспомогательных элементах и комплексной аналитико-визуальной обработке данных физического моделирования гидроаэродинамических процессов в прототипах вспомогательных элементов энергетических агрегатов. Система позволяет решить важную научно-прикладную проблему повышения эффективности гидроаэродинамических процессов во вспомогательных элементах энергетических агрегатов.

Ключевые слова: информационные модели, представления знаний, информационные технологии, поддержка принятия решений, эффективность гидроаэродинамических процессов, вспомогательные элементы энергетических агрегатов.

Розроблено розподілену проблемно-орієнтовану систему підтримки прийняття рішень, яка базується на відповідних інформаційних технологіях при проведенні комплексних моніторингу та моделюванні стану гідроаеродинамічних процесів в енергетичних агрегатах і їх допоміжних елементах, а також комплексної аналітико-візуальної обробки даних фізичного моделювання гідроаеродинамічних процесів в прототипах допоміжних елементів енергетичних агрегатів. Система дозволяє вирішити важливу науково-прикладну проблему підвищення ефективності гідроаеродинамічних процесів у допоміжних елементах енергетичних агрегатів.

Ключові слова: інформаційні моделі, представлення знань, інформаційні технології, підтримка прийняття рішень, ефективність гідроаеродинамічних процесів, допоміжні елементи енергетичних агрегатів.

Введение. В настоящее время, когда проблема энергетической независимости Украины вышла на первый план, усиливается роль информационных технологий автоматизации функций производственного и организационного управления для решения ряда проблем по повышению эффективности энергетических предприятий [1, 2]. Одна из наиболее существенных проблем обусловлена противоречием между современными требованиями к повышению эффективности *действующего энергетического оборудования* (ДЭО) базового уровня, которое обеспечивает *гидроаэродинамические процессы* (ГП) подъема, сжатия, расширения и транспортировки жидкостей и газов, и ограниченностью существующих функций производственного и организационного управления этими процессами. Средства автоматизации указанных функций на энергетических предприятиях, как правило, не содержат информационных технологий поддержки принятия решений по повышению эффективности ГП в ДЭО базового уровня функционирования – энергетических агрегатов [3–5]. Это связано, в основном, с отсутствием единого информационного пространства для оценки состояния ГП в ДЭО и слабой формализацией процесса повышения их эффективности при совершенствовании основных и

вспомогательных элементов энергетических агрегатов. При таких условиях актуальна разработка распределенной проблемно-ориентированной *системы поддержки принятия решений* (СППР) повышения эффективности ГП в ДЭО, которая базируется на исследованиях, связанных с [6–8]:

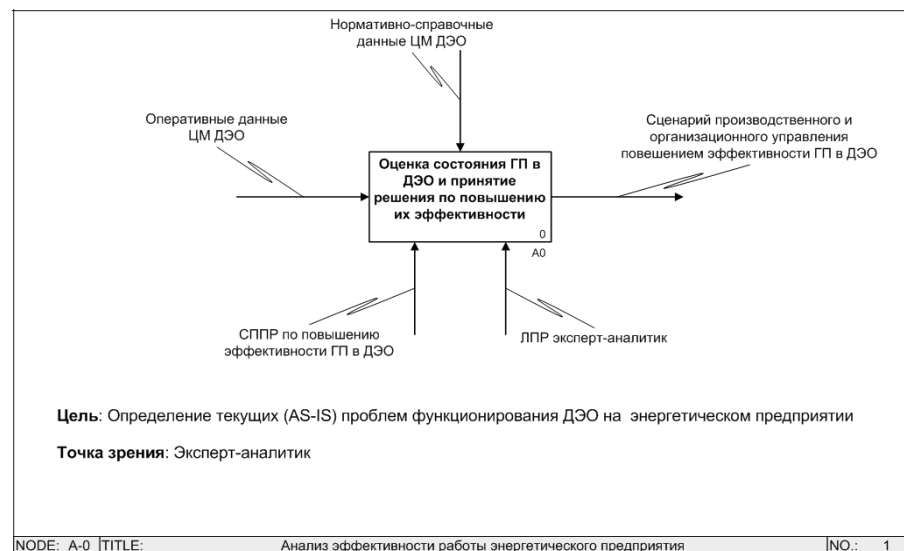
- представлением и систематизацией информации о структуре, свойствах и параметрах гидроаэродинамических процессов на различных уровнях функционирования ДЭО в едином информационном пространстве;
- мониторингом состояния ГП на уровне энергетических агрегатов и их вспомогательных элементов;
- комплексной аналитико-визуальной обработкой информации данных физического моделирования о состоянии ГП в физических прототипах вспомогательных элементов энергетических агрегатов.

Проблемно-ориентированная СППР по повышению эффективности ГП в ДЭО

Разработанная авторами проблемно-ориентированная СППР по повышению эффективности ГП в ДЭО имеет вид диалоговой системы эксперта-аналитика, позволяющая извлекать, представлять и использовать его знания при постро-

ении базы знаний цифрового макета (ЦМ) ДЭО для анализа состояния ГП в энергетических агрегатах, их элементах и автоматизации принятия решений по их совершенствованию с целью повышения эффективности ГП. Для моделирования, визуализации и анализа процесса принятия решений при разработке СППР использована методология структурного анализа и проектирования *SADT* (*Structured Analysis and Design Technique*) [9] в нотации функционального моделирования *IDEF0* (рис. 1, а). С учетом этого разработана структура проблемно-ориентированной СППР по повышению эффективности ГП в ДЭО (рис. 1, б), состоящая из подсистем ввода, хранения, анализа данных и принятия решений, объединенных между собой интерфейсными средствами для лица, принимающего решения (ЛПР).

Подсистема ввода данных включает в себя блоки комплексного мониторинга функционального состояния агрегатов и комплексного моделирования ГП во вспомогательных элементах. Подсистема хранения данных реализована на основе фреймовой модели базы знаний в виде цифрового макета ЦМ ДЭО, составляющий часть единого информационного пространства энергетического предприятия и объединяет следующие характеристики оборудования: технологические – сервера сбора данных, геометрические и технико-экономические – сервера АСУ и гидроаэродинамические – сервера моделирования.



а

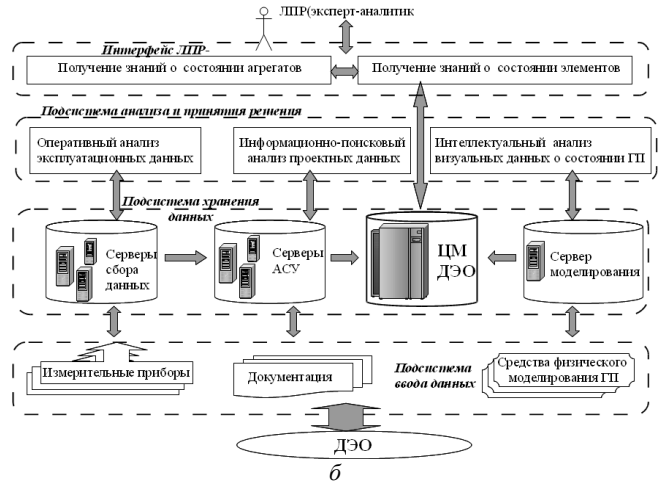
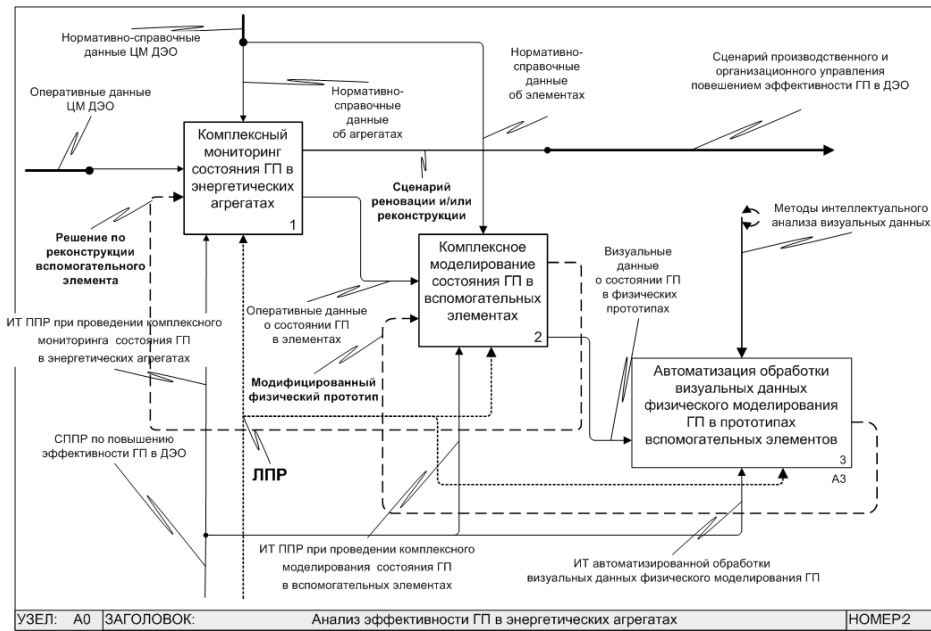


Рис. 1. СППР по повышению эффективности ГП в ДЭО: а – контекстная диаграмма функциональной модели разработки, б – структура.

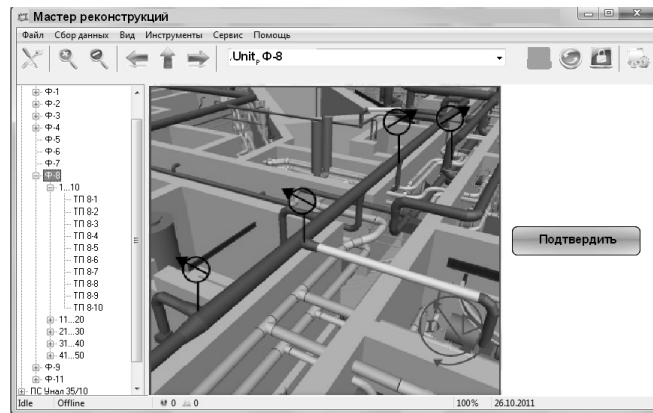
Подсистема анализа и принятия решений состоит из блоков информационно-поискового анализа проектных данных на базе СУБД, оперативного анализа эксплуатационных данных на основе технологий *OLAP* и интеллектуального анализа визуальных данных о состоянии ГП с использованием методов и алгоритмов *Data Mining*. Кроме того, разработанная СППР учитывает функционально распределенный характер процесса принятия решений по совершенствованию ДЭО на основе трех связанных между собой информационных технологий поддержки принятия решений (ИТ ППР) при проведении комплексных (рис. 2, а):

- мониторинга состояния ГП в сложных концептуальных объектах ДЭО – энергетических агрегатах на основе анализа нормативно-справочной проектной и оперативной эксплуатационной информации об агрегатах;

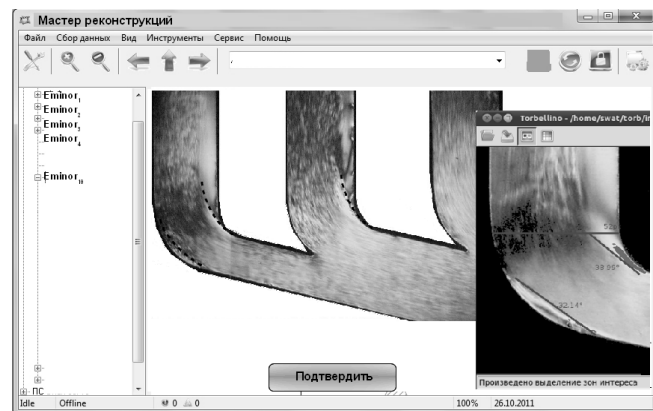
- моделирования ГП в простых концептуальных объектах ДЭО – вспомогательных элементах на основе анализа нормативно-справочной проектной оперативной эксплуатационной информации, а также информации, полученной при физическом моделировании;



а



б



в

Рис. 2. СППР по повышению эффективности ГП во вспомогательных элементах энергетических агрегатов: а – диаграмма декомпозиции второго уровня функциональной модели б – экранная форма мониторинга состояния ГП в агрегатах, в – экранная форма комплексного моделирования ГП во вспомогательных элементах

• аналитико-визуальной обработки данных физического моделирования ГП в прототипах вспомогательных элементов энергетических агрегатов для синтеза их модифицированного физического прототипа.

ИТ ППР при проведении комплексного мониторинга и моделирования состояния ГП

В соответствии с разработанными ИТ ППР комплексного мониторинга и моделирования состояния ГП в энергетических агрегатах и их вспомогательных элемен-

тах процесс принятия решений ЛПР по совершенствованию ДЭО с целью повышения эффективности ГП можно представить в виде последовательности, состоящей из четырех шагов.

Шаг 1. Из иерархически упорядоченных списков агрегатов (рис. 2, б) ЦМ ДЭО выбирается наименование анализируемого агрегата, и ЛПР (эксперт-аналитик) получает доступ к нормативно-справочной из сервера АСУ и оперативной из серверов сбора данных информации. Оперативные данные записываются в ЦМ ДЭО в усредненном виде за определенный временной период (см. рис. 1, б). Сравнение затрат мощности по норме и фактических (оперативных) позволяет признать анализируемый агрегат проблемным.

Шаг 2. Из иерархически упорядоченных списков элементов, входящих в состав проблемного агрегата в ЦМ ДЭО (рис. 2, в) выбирается наименование анализируемого элемента. Сравнение значений гидроаэродинамических сопротивлений по норме (нормативно-справочная информация) и фактических (оперативная информация) позволяет признать анализируемый элемент проблемным.

Шаг 3. На экспериментальном стенде проводится серия экспериментов по физическому моделированию ГП в проблемном вспомогательном элементе с целью анализа причин высокого

гидроаэродинамического сопротивления. ЛПР получает доступ к данным каждого эксперимента по его номеру из списка (рис. 2, в). По каждому эксперименту согласно разработанной параметрической модели вспомогательного элемента в базе данных на сервере моделирования (см. рис. 1, б) имеется следующая информация: геометрические модели исходного и модифицированного физических прототипов анализируемого вспомогательного элемента; значения гидроаэродинамических сопротивлений в них; данные о состоянии ГП в физическом прототипе элемента согласно информационной модели ГП. ЛПР анализирует полученные экспериментальные данные с учетом разработанных классификационных правил и в случае положительного решения подтверждает его принятие. При этом окончательные данные моделирования из базы данных на сервере моделирования перезаписываются в ЦМ ДЭО (см. рис. 1, б), уточняя значения соответствующих полей, и становятся доступными для дальнейшего анализа.

Шаг 4. Для принятия окончательного решения по совершенствованию элемента на основе анализа собранной (интегрированной) в ЦМ ДЭО информации ЛПР вводит дополнительные сведения о сложности реализации и согласований по предлагаемой реконструкции вспомогательного элемента и возможной ее окупаемости. При этом значение окупаемости зависит от прогнозируемого снижения гидроаэродинамического сопротивления. В результате формируется матрица решений.

Информационная технология комплексной аналитико-визуальной обработки данных физического моделирования ГП в прототипах вспомогательных элементов энергетических агрегатов

В соответствии с разработанной информационной технологией комплексная аналитико-визуальная обработка данных (ИТ КАВОД) физического моделирования ГП в прототипах вспомогательных элементов энергетических агрегатов состоит из трех основных стадий (рис. 3, а): подготовительной стадии обработки визуальных данных о состоянии ГП с целью получения информационной модели гидроаэродинамических

структурных примитивов (ГСП), их интеллектуального анализа с целью получения информационной модели ГП и принятия решения о повышении эффективности ГП в виде синтеза модифицированного физического прототипа вспомогательного элемента на основе информационной модели ГП [10, 11]. Интерфейс ЛПР содержит средства для управления диалогом в виде экранных форм, показанных на рис. 3, б–д. При этом процесс принятия решений ЛПР при создании модифицированного прототипа вспомогательного элемента с пониженным гидроаэродинамическим сопротивлением можно представить в виде последовательности, состоящей из четырех шагов.

Шаг 1. Получение информационной модели гидроаэродинамических структурных примитивов (ГСП) – $IPrim$, которая связывает визуальные $Data_{VP}$ и интеллектуальные данные $Data_{IP}$, имеет вид:

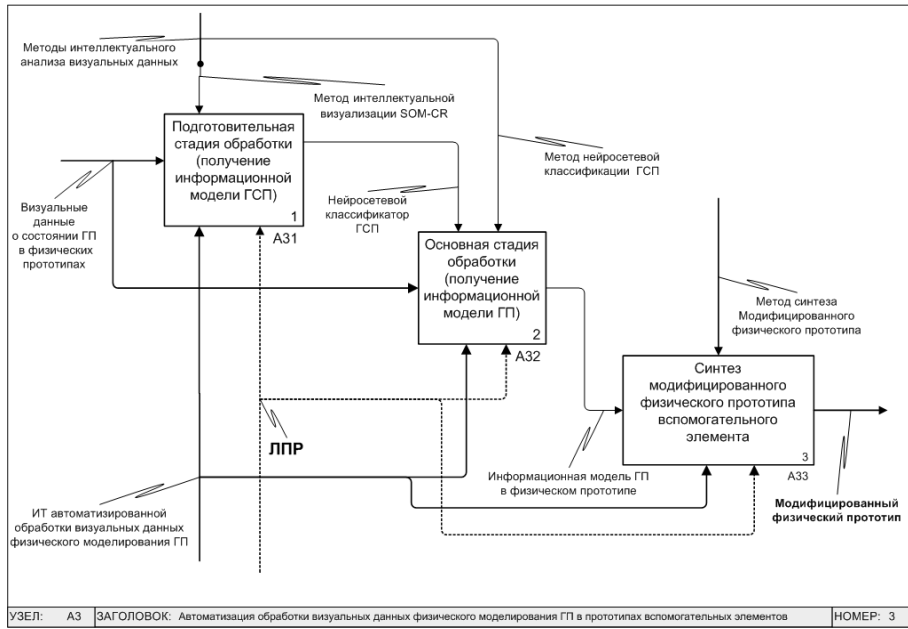
$$IPrim = \langle Meta_{IP}, Data_{VP}, Data_{IP} \rangle, \quad (1)$$

где $Meta_{IP}$ – заголовок информационной модели, содержащий общую информацию о ГСП, имеет вид:

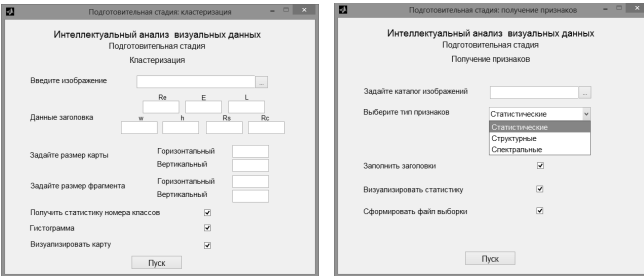
$$Meta_{IP} = \langle Id, d_w, d_H, F, K \rangle, \quad (2)$$

где d_w, d_H – экспериментально определяемые горизонтальный и вертикальный размеры ГСП в пикселах, зависящие от режима получения ГП; Id – идентификатор; F – множество групп статистических, спектральных, структурных и структурно-спектральных признаков; K – номер класса.

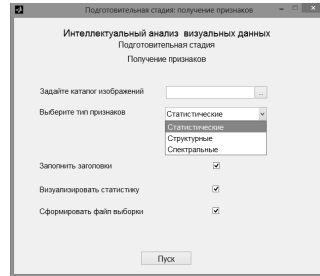
Визуальные данные ГСП $Data_{VP}$, представляют собой элементарный производный фрагмент визуальных данных ГП, в котором обеспечивается псевдостационарность ГП, согласованная с режимом их получения, определим как $Data_{VP} = \{B_{ij}\}$, $i = \overline{1, d_w}$, $j = \overline{1, d_H}$, где B_{ij} – значение интенсивности (яркости) освещенности точки (пиксела) изображения с координатами i и j . Интеллектуальные данные ГСП $Data_{IP}$ – результат интеллектуального анализа $Data_{VP}$ определим как $Data_{IP} = \{Bk_{ij}\}$, $i = \overline{1, d_w}$,



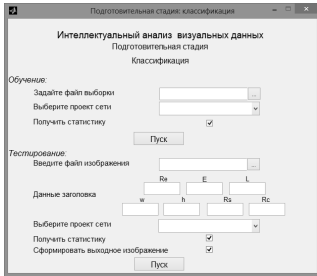
а



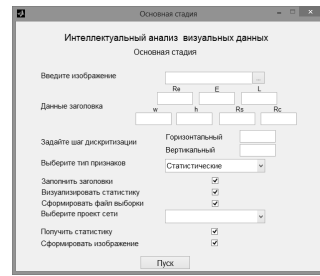
б



в



г



д

Рис. 3. СППР по повышению эффективности ГП во вспомогательных элементах энергетических агрегатов: а – диаграмма декомпозиции третьего уровня функциональной модели разработки, б, в, г, д – экранные формы интерфейса ЛПП

$j = \overline{1, d_H}$, где Bk_{ij} – зависящее от K значение псевдоцвета пиксела изображения с координатами i и j .

Для получения визуальных данных ГСП $Data_{VP}$ ЛПП из экспериментальных данных сервера моделирования выбирает подлежащие анализу визуальные данные ГП. Условия их получения содержатся в данных заголовка и ото-

бражаются в соответствующих полях формы «Кластеризация» интерфейса ЛПП (рис. 3, б). На основе предварительного анализа данных заголовка ЛПП задает параметры (размеры карты Кохонена [12] и размеры ГСП) для выделения кластеров ГСП. В результате проведения кластеризации визуальные данные $Data_{VP}$ из разных кластеров ГСП сохраняются в виде набора изображений в отдельных каталогах. Далее они подвергаются интеллектуальному анализу для получения групп призна-

наков, которые записываются в соответствующие поля заголовка $Meta_{IP}$ (2) (рис. 3, в). При установке соответствующих флажков формируется файл обучающей выборки, который содержит векторы необходимых признаков ГСП для построения классификатора на следующем шаге.

Шаг 2. Выбор и адаптация нейросетевого классификатора выполняется для получения интеллектуальных данных ГСП $Data_{IP}$ (1) (рис. 3, г). С помощью данной диалоговой формы ЛПП выбирает из списка проектов нейронных сетей на сервере моделирования необходимый проект с заданной топологией многослойного персептрона и параметрами его обучения. Проекты получены на этапе предварительных исследований. Далее проводится его адаптация (обучение/дообучение) с использованием файла обучающей выборки, полученного на предыдущем шаге.

Шаг 3. Получение информационной модели ГП – IE_{minor_G} , связывающей визуальные $Data_{VE}$ и интеллектуальные данные $Data_{IE}$ и имеет вид

$$IE_{minor_G} = \langle Meta_{VE}, Data_{VE}, Data_{IE} \rangle, \quad (3)$$

где $Meta_{VE}$ – заголовок информационной модели содержит общую информацию о режиме получения визуальных данных ГП $Data_{VE}$ на

экспериментальном стенде физического моделирования и имеет вид

$$Meta_{VE} = \langle Re, E, L, Dw, Dh, R_S, R_C \rangle, \quad (4)$$

где Re – число Рейнольдса ($10^4 \leq Re \leq 10^6$) задает параметры моделируемого ГП с учетом подобия его реальному процессу; E – выдержка в диапазоне ($1/30 \div 1/2000$ с); L – мощность освещения в диапазоне ($25 \div 1000$ Вт); Dw – горизонтальный размер изображения в пикселах; Dh – вертикальный размер изображения в пикселах; R_S – пространственное разрешение в пикселах на дюйм (ppi); R_C – цветовое разрешение один или три байта.

Визуальные данные о состоянии ГП $Data_{VE}$ – изображения искусственных поверхностей распределения интенсивности освещенности (цветности), однозначно характеризующие поле градиентов скоростей (давлений) ГП в физическом прототипе вспомогательного элемента (рис. 2, в и 4, а). Динамические искусственные поверхности распределения градиентов скоростей (давлений) ГП получены путем использования метода визуализации дискретных структур потока, принадлежащего к классу поляризационно-оптических методов визуализации прозрачных рабочих тел на основе использования оптически активной жидкости [13, 14]. Визуальные данные о состоянии ГП $Data_{VE}$ определены как $Data_{VE} = \{B_{ij}\}$, $i = \overline{1, Dw}$, $j = \overline{1, Dh}$, где B_{ij} – зависящее от R_C значение интенсивности (яркости) освещенности пиксела изображения с координатами i и j .

Интеллектуальные данные ГП $Data_{IE}$ представляют собой знания, извлекаемые из визуальных данных ГП $Data_{VE}$ и с учетом (3) определены как объединение интеллектуальных данных ГСП $Data_{IP}$:

$$Data_{IE} = [R_{IE}] \bigcup_{i=1}^X \bigcup_{j=1}^Y Data_{IPi,j}, \quad (5)$$

где $X = (Dw \cdot R_S) / d_w$, $Y = (Dh \cdot R_S) / d_H$ – количество ГСП по горизонтали и вертикали соответственно; R_{IE} – правило их объединения.

Для получения $Data_{IE}$ ЛПП с помощью диалоговой формы (рис. 3, д) выбирает изображе-

ние (визуальные данные ГП), задает шаг дискретизации его на фрагменты в соответствии с информацией о размерах ГСП, полученных при кластеризации на шаге 1 (рис. 4, а). Далее для каждого из полученных фрагментов изображений вычисляются признаки, на основе чего формируется тестовая выборка. Последняя подается на нейросетевой классификатор, принимающий решение [14, 15], на основе чего формируются интеллектуальные данные ГП $Data_{IE}$, представляющие собой карту решений (рис. 4, б)

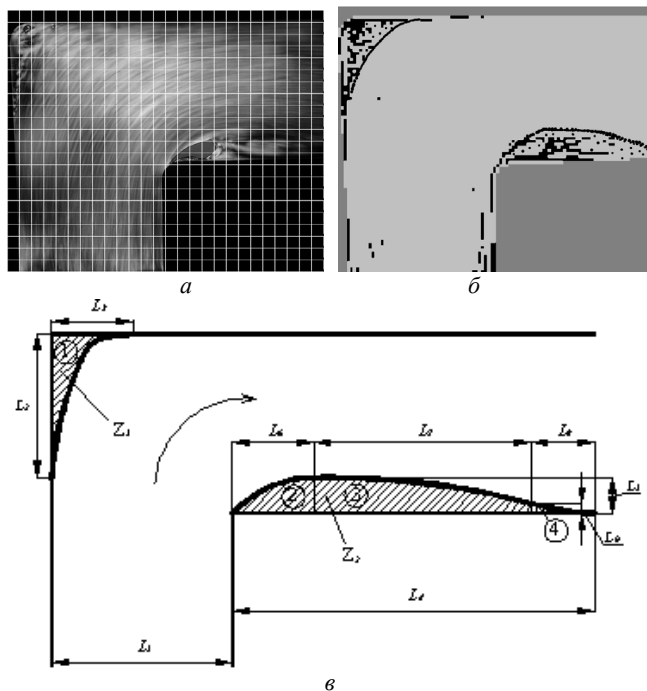


Рис. 4. Результаты использования ИТ КАВОД физического моделирования ГП в прототипе вспомогательного элемента поворот потока на 90° (а – дискретизация, б – интеллектуальные данные ГП, в – добавление вставок-легал)

Шаг 4. Синтез модифицированного прототипа вспомогательного элемента. На основе полученных $Data_{IE}$ выполняется синтез модифицированного физического прототипа с использованием морфологической обработки, состоящей из удаления связанных неинформативных областей; определения связанных информативных областей; определения внутренней границы связанных информативных областей; получения с помощью аппроксимации аналитического описания огибающей внутренних границ связанных областей, а также получения модифицированного физиче-

ского прототипа вспомогательного элемента с помощью добавления вставок–легал, выполненных с учетом коэффициента масштабирования (1–4 – зоны вставок–легал на рис. 4, в).

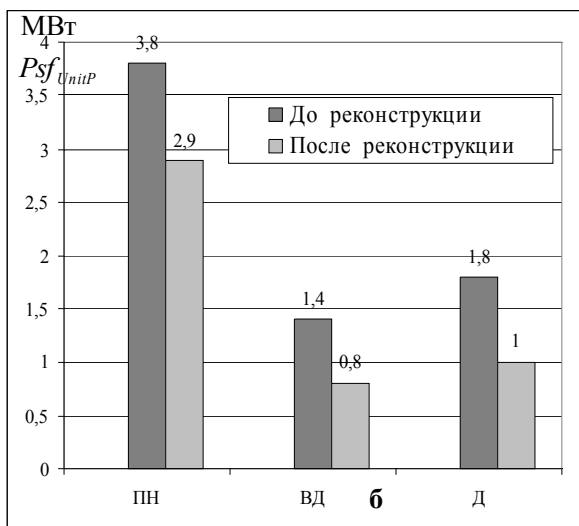
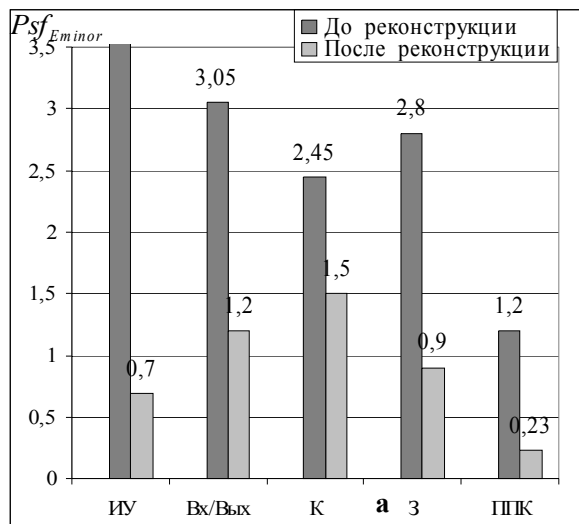


Рис. 5. Обобщенные показатели эффективности ГП в ДЭО

Заключение. С помощью разработанной СППР по повышению эффективности ГП во вспомогательных элементах энергетических агрегатов решен ряд актуальных научно-практических задач производственного и организационного управления процессом повышения эффективности работы ДЭО на энергетических предприятиях. Так, разработаны сценарии производственного и организационного управления проведением реконструкции вспомогательных элементов энергетических агрегатов позволили

повысить эффективность ГП в них путем снижения гидроаэродинамических сопротивлений Psf_{Eminor} в следующих элементах: в измерительных устройствах (ИУ) в пять раз, во входных и выходных патрубках (Вх/Вых) в 2,25 раза, в распределительных коллекторах (К) в 1,4 раза и в поворотах типа колено (ПТК) в 5,2 раза (рис. 5, а). Снижение гидроаэродинамических сопротивлений во вспомогательных элементах позволило повысить эффективность ГП в энергетических агрегатах вследствие уменьшения электрической мощности агрегата Psf_{UnitP} , расходуемой на создание гидроаэродинамического потенциала (давления для обеспечения заданного значения расхода или его увеличения) в основных элементах (рис. 5, б): питательных насосах (ПН) на 24 процента, вентиляторах дутьевых (ВД) на 43 процента, дымососах (Д) на 45 процентов.

1. Егоров С.Я. Аналитические и процедурные модели компоновки оборудования промышленных производств. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 104 с.
2. Андрианова И.И., Арсирій В.А. Економічний аналіз енерго- і ресурсозберігаючих інновацій для теплової енергетики // Актуальні проблеми економіки. – 2010. – № 12 (114). – С. 33–44.
3. Программный комплекс icDPM. – <http://intelcom.ru/?icdpm>
4. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. – М.: Синтег, 1998. – 376 с.
5. Simon H.A. The new science of management decision. Englewood Cliffs, N.Y.: Prentice-Hall Inc., 1977.
6. Арсирій Е.А. Иерархическая модель данных для поддержки принятия решений при интенсификации процессов // Электротехнические и компьютерные системы. – 2013. – № 10(86). – С. 133–138.
7. Арсирій Е.А. Разработка моделей элементов гидроаэродинамических систем на основе средств интеллектуальной визуализации // Вост.-Европ. ж. передовых технологий. Энергосберегающие технологии и оборудование. – 2013. – 3/8(63). – С. 4–8.
8. Арсирій Е.А., Антошук С.Г., Трофимов Б.Ф. Система поддержки принятия решений по повышению эффективности гидроаэродинамических процессов в действующем энергетическом оборудовании // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 16(92). – С. 128–135.
9. Дэвид А. Марка., Клемент МакГоуэн. Методология структурного анализа и проектирования SADT. – 1999. – www.interface.ru/fset.asp?Url=/case/sadt0.htm

10. *Арсирій О.О., Антощук С.Г., Василевська О.П.* Комплексне моделювання і інтелектуальний аналіз візуальних даних в САПР елементів систем транспортування // Матеріали XI Всеукр. міжнар. конф. з оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів «УкрОбраз'2012». – Львів: Львівська політехніка. – С. 91–95.
11. *Арсирій О.О., Антощук С.Г., Бабілонга О.Ю.* Аналітико-візуальна обробка даних фізичного моделювання гідроаеродинамічних процесів в об'єктах енергетичного обладнання // Праці XII Всеукр. міжнар. конф. з оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів «УкрОбраз'2014». – С. 123–126.
12. *Kohonen T.* The self-organizing map / Neural Networks: Theoretical foundations and analysis. – New York: IEEE Press. – 1992. – P. 1464–1480.
13. *Арсирій В.А., Бычков Ю.М.* Поляризационно-оптический метод визуализации тонких струй в затопленном пространстве // Сиб. физ.-техн. ж. – 1992. – 2. – С. 64–69.
14. **Пат. PST 5.812.423 USA** Method of determining for working media motion and designing flow structures for same // V.S. Maisotsenko, V.A. Arsiri. – Publ. 22.09.1998.

E-mail: e.arsiriy@gmail.com, arsiriy@te.net.ua
 © Е.А. Арсирій, С.Г. Антощук, В.А. Арсирій, А.И. Гуда, 2015

UDC 004.832:[621.31:532

E.A. Arsirii, S.G. Antoschuk, V.A. Arsiry, A.I. Huda

Decision Making Support for Increasing Efficiency of Hydro-Aerodynamic Processes in Minor Elements Power Units

Keywords: information models, knowledge representation, information technology, decision support, efficiency of hydro-aerodynamic processes, minor elements power units.

The distributed problem-oriented system is developed to support the decision making on increasing efficiency of the hydro-aerodynamic processes (HP) inside the minor elements power units. This system is based on three brand new informational technologies to support the decision making connected to each other. These technologies are intended to conduct:

- complex monitoring HP in combined conceptual objects power equipment at a basic level – power units based on the analysis of the regulatory-referential design and operational information about power units;
- complex modeling HP in simple conceptual objects power equipment at a basic level – the minor elements based on the analysis of the regulatory-referential design and operational information as well as information retrieved from a physical modeling;
- complex analytic and visual processing data from a physical modeling HP inside the minor element prototypes of the power units to synthesis of their updated physical prototype.

System support decision making is functional-distributed and consists of subsystems on input, storage, data analysis and decision making, combined by interface tools for decision making person. Informational relationship of mentioned functional-distributed subsystems is based on decision making person interface and developed digital mockup of the power equipment. The digital mockup is a part of united informational space of energetic enterprise and joins the following equipment features: the technological – data gathering servers, geometric and tech-economic – ASU servers and hydrodynamic – modeling servers. Thus, the developed system gives the opportunity to automate decision making process on increasing efficiency HP in power equipment at a basic level, where the major idea is to provide decision making person complete information about HP state inside the power units and its minor elements and developing rational scenarios of the organizational and production control over the reconstruction.

