

УДК 621.3:004.9

Е.А. АРСИРИЙ<sup>1</sup>, С.Г. АНТОЩУК<sup>1</sup>, В.А. АРСИРИЙ<sup>2</sup>, В.И. КРАВЧЕНКО<sup>1,3</sup><sup>1</sup> *Одесский национальный политехнический университет, Украина*<sup>2</sup> *Одесская академия строительства и архитектуры, Украина*<sup>3</sup> *ЗАО Молдавская ГРЭС, Молдова*

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРИ КОМПЛЕКСНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Для повышения надежности работы энергетического оборудования в условиях ужесточения экологических норм и общего физического износа нагнетателей предлагается технология проектирования элементов систем транспортирования с пониженными гидравлическими сопротивлениями. Основу технологии проектирования составляет комплексное моделирование, использующее инструментальные средства физического и численного моделирования в сочетании с возможностями интеллектуального анализа данных. Приведены результаты исследования, демонстрирующие преимущества технологии проектирования элементов систем транспортирования сложной формы на основе комплексного моделирования.*

**Ключевые слова:** надежность энергетического оборудования, гидравлические сопротивления, комплексное моделирование, средства интеллектуального анализа.

### Введение

Показатели надежности энергетического оборудования существенно зависят от режимов его работы. При паспортной нагрузке (номинальный режим), когда для обеспечения горения в котле используется основное топливо, коэффициенты технического использования и готовности энергетического оборудования имеют максимальные значения. Современное ужесточение экологических норм потребовало установки дополнительных фильтров и систем очистки, что на фоне общего физического износа нагнетателей (насосы, вентиляторы, компрессоры) привело к существенному увеличению сопротивлений систем транспортирования воздуха и газов и как следствие невозможности работы в номинальном режиме и значительному снижению уровня надежности энергетического оборудования.

Одним из путей обеспечения номинальной мощности и повышения надежности работы энергетического оборудования без дорогостоящей замены нагнетателей является снижение гидравлических сопротивлений в элементах систем транспортирования (ЭСТ) жидкостей или газов, таких как коллекторы, повороты, тройники, внезапные расширения или сужения и т. п. При этом работы исследователей в областях механики жидкости и газов, гидравлических и аэродинамических машин, САПР и интеллектуальных информационных технологий показывают, что наиболее важной теоретической и практиче-

ской проблемой считается выявление и исследование влияния структуры гидроаэродинамических потоков на гидравлические сопротивления в ЭСТ сложной формы [1 – 3]. Для решения этой проблемы совершенствуются существующие методы физического и численного моделирования и анализа гидроаэродинамических потоков в сложных ЭСТ.

### 1. Средства ФМ, ЧМ и ИАД при КМ

С одной стороны автоматизируются методы физического моделирования (ФМ), основанные на теории подобия и анализе размерностей для создания экспериментальных установок, методики и техники эксперимента, способов измерения и обработки экспериментальных данных, позволяющих учитывать гидравлические сопротивления в сложных ЭСТ. С другой стороны развитие средств компьютерной техники дает возможность совершенствовать методы численного моделирования (ЧМ), включать в некоторых случаях расчеты гидравлических сопротивлений сложных ЭСТ при решении дифференциальных уравнений и визуализировать решения с помощью методов компьютерной графики. Необходимо заметить, что применение ФМ и ЧМ для снижения гидравлических сопротивлений в сложных ЭСТ имеет ряд недостатков. С одной стороны это – сложность достижения физического подобия между моделью и реальным оборудованием, практическая невозможность воспроизведения натуральных

гидрофизических и временных условий в рамках лабораторного оборудования.

С другой стороны это – длительность компьютерного эксперимента для диагностики сложных гидроаэродинамических потоков, сложность оценки точности полученного решения, сложность задания начальных условий ЧМ и выбора множества параметров для расчетов, сложность построения моделей турбулентности. При этом качество и надежность принимаемых решений для снижения гидравлических сопротивлений в сложных ЭСТ с помощью ФМ и ЧМ зависит от квалификации эксперта-экспериментатора и требует значительных затрат ресурсов.

Для устранения перечисленных недостатков ФМ и ЧМ при проектировании ЭСТ с пониженными гидравлическими сопротивлениями авторами предлагается создание комплексного моделирования (КМ), использующего инструментальные средства ФМ и ЧМ в сочетании с возможностями интеллектуального анализа данных (ИАД) [4]. При этом технология проектирования ЭСТ на основе КМ-ИАД включает четыре этапа (рис. 1):

1) подготовительный – проектирование геометрии моделируемого ЭСТ с помощью одного из редакторов САПР для последующего изготовления исходного шаблона. Шаблон представляет собой лист калиброванного материала с вырезанным каналом, моделирующим геометрию одного из сечений ЭСТ в соответствии с масштабом моделирования. Шаблон монтируется в моделирующее устройство. Типовое моделирующее устройство состоит из двух покровных плит из оптически неактивного стекла, в которых вырезаны входные и выходные каналы. Плиты жестко соединены между собой с помощью крепежного механизма, и их толщина выбирается из условия обеспечения герметичности и постоянства объема в моделируемом ЭСТ при различных рабочих давлениях;

2) визуальный – визуализация гидродинамических процессов в моделирующем устройстве на экспериментальном стенде, которая выполняется на основе просвечивания поляризованным светом оптически активной жидкости в моделирующем устройстве. Для получения оптически активной жидкости в жидкость добавляется 0,06 % пятиокиси ванадия при этом ее вязкость остается неизменной. По разности интенсивности освещенности в каждой точке потока можно судить о распределении скоростей / давлений и о физической сущности гидродинамических процессов в моделируемом ЭСТ. Для получения модели структуры потока (изображения) визуальные картины фоторегистрируют;

3) интеллектуальный – интерпретация визуальной информации о структуре гидродинамических

потоков, с целью принятия решений о необходимости структурных изменений (модификации) шаблона ЭСТ для получения результирующей геометрии. На этом этапе выполняются предварительная обработка изображений структуры потоков; кластеризация (сегментация) полей скоростей / давлений на элементарные, непрямые элементы – гидродинамические структуры и их классификация;

4) экспериментальный – проектирование результирующей геометрии в редакторе САПР и изготовление результирующего шаблона; испытания шаблонов на экспериментальном стенде, который с помощью пневматической напорно-распределительной части обеспечивает движение жидкости в моделирующем устройстве с заданными гидродинамическими параметрами (объем и давление). Построение и анализ эмпирических гидродинамических характеристик моделей ЭСТ, синтез полуэмпирических и прогнозирование теоретических гидродинамических характеристик ЭСТ, принятие окончательного решения о конструкции канала

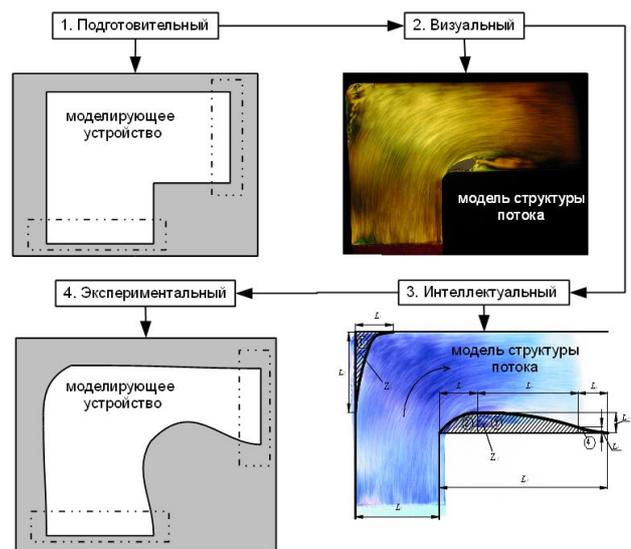


Рис. 1. Схема КМ-ИАД при проектировании геометрии ЭСТ «поворот потока на 90°»

Одним из основных источников ненадежной работы (сбоев) оборудования отечественных энергетических блоков является сложность гидроаэродинамических систем, особенностями которых является наличие коротких участков трубопроводов и большого количества соединительных элементов с высокими гидравлическими сопротивлениями.

Поэтому в качестве практического приложения технологии КМ-ИАД рассмотрим возможность снижения гидравлических сопротивлений в ЭСТ окислителя с необходимым количеством кислорода для обеспечения бесперебойного горения топлива в котле парогазовых энергоблоков.

## 2. Практическое приложение технологии КМ-ИАД

На принципиальной схеме системы транспортирования представлены два возможных варианта подвода окислителя для горения (рис. 2) при работе энергоблока в двух режимах:

– вариант 1 – режим паросиловой установки (ПСУ), когда работает только паровая турбина, а подача атмосферного воздуха с 21%-ным содержанием кислорода в котел для обеспечения горения осуществляется с помощью дутьевых вентиляторов (ДВ);

– вариант 2 – режим парогазовой установки (ПГУ), когда работают одновременно паровая и газовая турбина (ГТ), а подача атмосферного воздуха с помощью компрессора (К) осуществляется в газовую турбину, дымовые газы после ГТ представляют собой смесь с 16%-ным содержанием кислорода –

окислитель, который сбрасывается в котел для обеспечения горения топлива.

Известно, что КПД энергоблока в режиме ПГУ составляет более 55%, а в режиме ПСУ менее 40%, поэтому предпочтительным режимом работы парогазовых энергоблоков является режим ПГУ. Однако следствием сложной схемы системы транспортирования окислителя в котел (рис. 2) является наличие в ЭСТ высоких гидравлических сопротивлений, из-за которых увеличивается давление и, соответственно, температура после ГТ. При этом ГТ не обеспечивает номинальной мощности, а энергоблок не работает в номинальном режиме, и значительно уменьшаются коэффициенты технического использования и готовности энергетического оборудования при обеспечении пиковых нагрузок в энергосистеме, что оказывает негативное влияние на надежность энергоблока в целом.

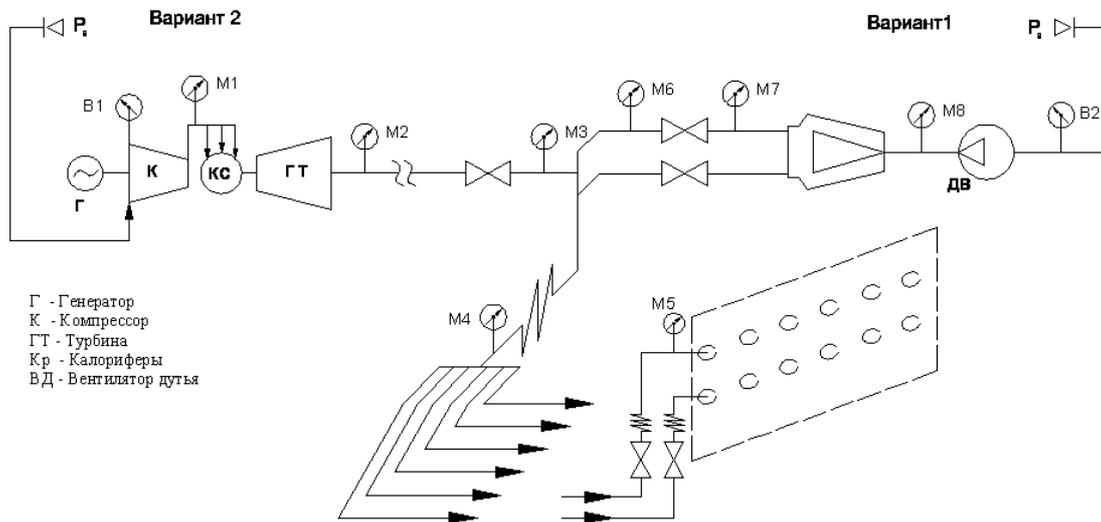


Рис. 2. Совмещенная схема системы транспортирования окислителя в котел парогазовых энергоблоков

Единственной возможностью увеличения мощности ГТ и показателей надежности работы энергоблока является снижение гидравлических сопротивлений системы транспортирования окислителя от газовой турбины в котел. Анализ справочных величин гидравлических сопротивлений [5] показал, что наибольшие сопротивления имеют следующие ЭСТ: тройник от ГТ и ДВ к котлу, аэродинамический зуб после тройника, *распределительный коллектор* (РК) и участок тракта после коллектора до горелок котла (рис. 2).

Изменение геометрии коллектора распределения окислителя по горелкам котла с целью снижения гидравлического сопротивления на основе КМ-ИАД осуществлялось в четыре этапа (рис. 1). На подготовительном этапе в редакторе AutoCAD спроектирован эскизный чертеж РК (рис. 3,а), на основании которого изготовлен исходный шаблон и

вмонтирован в моделирующее устройство необходимого типа (рис.3,б). Визуализация гидродинамических потоков в моделирующем устройстве на экспериментальном стенде позволила получить картину распределения скоростей / давлений (рис. 3, в). Авторами предлагается использовать интеллектуальный автоматизированный анализ картин распределения скоростей / давлений для определения зон отрыва гидродинамического потока от стенок канала и разработки рекомендации по их устранению при проектировании результирующей геометрии моделируемого элемента.

Такой подход снижает гидравлических сопротивлений в РК за счет устранения зон отрыва и повышает надежность гидродинамического оборудования.

Интеллектуальный автоматизированный анализ включает следующие основные процедуры:

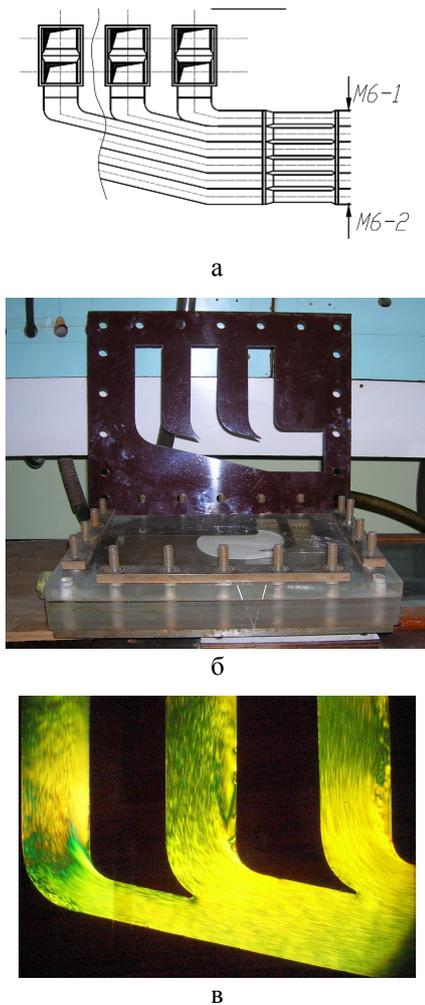


Рис. 3. Результаты 1-го и 2-го этапов проектирования РК на основе КМ-ИАД: а-эскизный чертеж, б- исходный шаблон и моделирующее устройство; в-визуализация гидродинамических процессов в моделирующем устройстве

– □ – конвертация цветного изображения в полутоновое с одновременной пороговой обработкой (порог «снизу»). Проводится с целью выделения зон интереса (рис. 4, а) и значительного сокращения объема анализируемой информации;

– сегментация полученного полутонового текстурного изображения на основе методов статистический анализа с помощью построения ковариационных матриц (матриц смежности), которые характеризуют статистики второго порядка и описывают пространственные связи пар яркостей элементов в изображении (рис. 4, б).

– пороговая обработка с помощью порога «сверху» для определения зон интереса с максимальной яркостью (рис. 4, в). Порог определяется экспериментально;

– морфологическая обработка выделенных зон интереса (рис. 4, г) для получения связных областей с максимальной яркостью;

– содержательная интерпретация изображений на основе связных областей, в результате которой определяются углы отклонения потока от стенок канала (рис. 4, д).

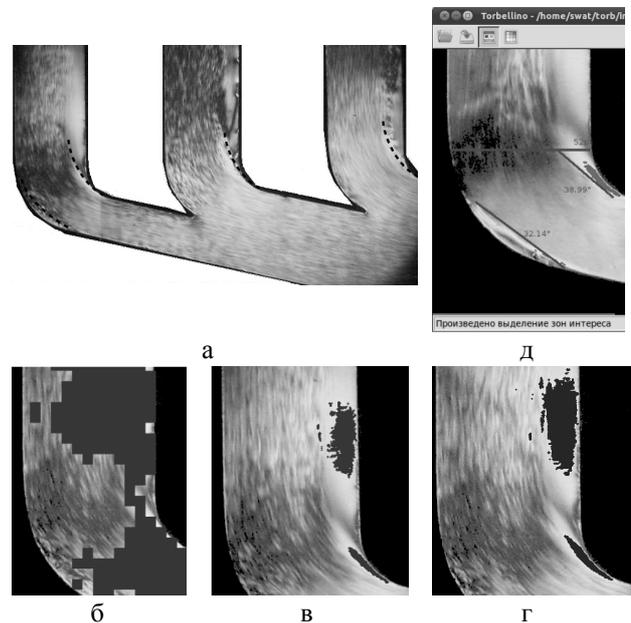


Рис. 4. Результаты 3-го этапа проектирования РК на основе КМ-ИАД: а – конвертации; б – сегментации; в – пороговой обработки; г – морфологической обработки; д – содержательной интерпретации.

Таким образом, на основе ИАД принимается решение о характере структуры гидродинамических потоков в модели РК, о наличии диссипативных участков и зон отрыва гидродинамического потока от стенок канала и формируется модель структурных изменений шаблона.

На основе полученной модели структурных изменений шаблона на экспериментальном этапе в редакторе AutoCAD выполняется проектирование результирующей геометрии РК (рис. 5, а). Пунктирными линиями показана исходная геометрия фрагмента проточной части РК, сплошными – результирующая. На основании эскизного чертежа изготовлен результирующий шаблон и вмонтирован в моделирующее устройство. Сравнительные испытания исходного и результирующего шаблонов на стенде моделирования показали снижение потерь напора  $P$  и гидравлического сопротивления  $\zeta$  в моделях РК. При испытаниях в достаточно широких диапазонах изменялся объемный расход ( $Q$ ) жидкости, а с помощью манометра измерялся напор (давление –  $P$ ). При этом величины  $P$  и  $\zeta$  связаны между собой с помощью формулы Дарси-Вейсбаха:

$$P = \zeta \rho V^2 / 2, \quad (1)$$

где  $V=Q/S$ , а  $V$  – скорость,  $\rho$  – плотность рабочего тела и  $S$  – площадь поперечного сечения в исследуемом ЭСТ.

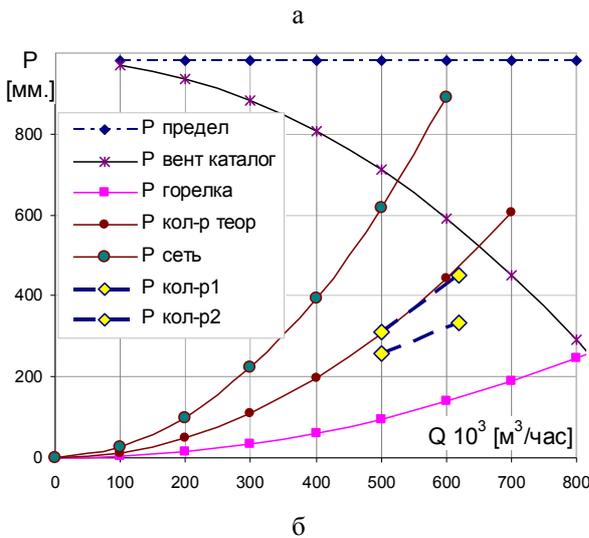
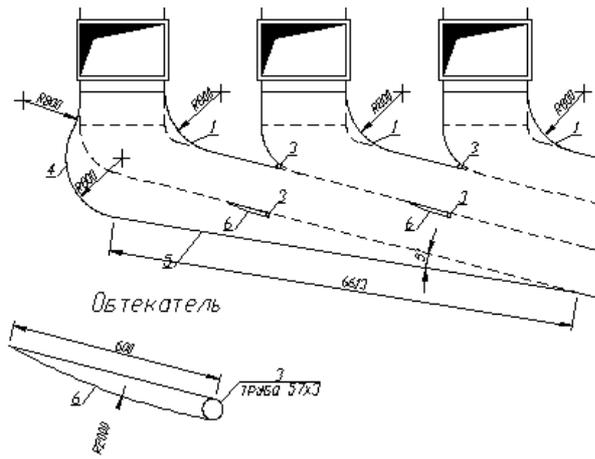


Рис. 5. Результаты 4-го этапа проектирования РК на основе КМ-ИАД: а – результирующий эскизный чертеж; б – семейство напорных характеристик

Однако, снижение  $P$  и  $\zeta$ , полученное с помощью квазидвумерного моделирования дает только качественную характеристику гидродинамических процессов в РК. Поэтому для количественного подтверждения уменьшения потерь напора и гидравлического сопротивления в РК необходимо построить аналитические напорные характеристики, которые характеризуют распределение давлений в разных сечениях системы транспортирования окислителя и сравнить с существующими в каталогах и экспериментально полученными на реальном оборудовании.

Как правило, для анализа гидродинамических процессов в системах транспортирования используют две напорные характеристики  $P = f(Q)$  – характеристику ( $P_{\text{вент каталог}}$ ) вентилятора (рис. 5, б), которая выбирается из каталога завода изготовителя вентиляторов и характеристику системы транспортирования ( $P_{\text{сеть}}$ ), рассчитываемую проектировщиком. Пресечение напорных характеристик дает рабочую точку, по которой определяют реальный объемный расход окислителя и напор развиваемый вентилятором. Однако напорные характеристики

вентилятора и сети (системы транспортирования) являются интегральными и не позволяют определить влияние снижения гидравлического сопротивления в РК на изменение гидродинамических показателей в системе. Поэтому с использованием зависимости (1) были построены аналитические напорные характеристики в различных сечениях системы транспортирования окислителя в котел. На рис. 5, б показаны напорные характеристики участков от топки котла до горелки ( $P_{\text{горелка}}$ ) и от топки котла до РК ( $P_{\text{кол теор}}$ ).

Для проведения испытаний на реальном оборудовании к существующим в системе транспортирования окислителя измерительным приборам – манометрам М1, М2 и М8 и вакуумметру В2 необходимо добавить несколько дополнительных манометров М3 – М7 (рис. 2). Экспериментальные напорные характеристики получены для участка от топки котла до РК (в обратном направлении относительно движения окислителя) и были построены согласно показаниям манометра М4 до ( $P_{\text{кол1}}$ ) и после ( $P_{\text{кол2}}$ ) проведения реконструкции РК. При этом они и в достаточной мере совпадают с аналитической напорной характеристикой ( $P_{\text{кол теор}}$ ) (рис. 5, б).

Дальнейшие расчеты показали, что снижение потерь напора в РК составило около 20%, а уменьшение гидравлического сопротивления – 11%. Это может позволить более чем на 1% увеличить вырабатываемую мощность газовой турбины и улучшить показатели надежности энергоблока в целом. В заключении необходимо заметить, что изменение геометрии каналов привело к ослаблению устойчивости конструкции РК. Для восстановления параметров жесткости дополнительно разработана геометрия обтекателя с небольшим гидравлическим сопротивлением, установка которого позволила сохранить утерянную жесткость (рис. 5,а).

## Выводы

Таким образом, одним из эффективных путей повышения надежности работы основного и вспомогательного энергооборудования, которое отработало предельный ресурс при одновременном ужесточении экологических требований, является снижение гидравлических сопротивлений элементов системы транспортирования за счет использования технологии проектирования, основанной на КМ-ИАД. Экспериментальные исследования показали, что технология проектирования ЭСТ сложной формы на основе комплексного моделирования имеет следующие преимущества:

- автоматизирует методы физического моделирования;
- сокращает длительность компьютерных расчетов при численном моделировании;

– позволяет повысить точность принятия решений благодаря интеллектуальному анализу данных, который предоставляет проектировщику средства автоматизации обработки, идентификации, классификации и интерпретации гидродинамических структур.

Внедрение технологии КМ-ИАД при проектировании ЭСТ сложной формы, таких как: коллекторы, повороты, тройники, внезапные расширения или сужения и т. п., показало возможность снижения их гидравлических сопротивлений от 10 до 40%,. Это позволяет снизить энергозатраты, увеличить вырабатываемую мощность и улучшить показатели надежности энергоблока в целом.

### Литература

1. Берже, П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности [Текст] / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М.: Мир, 1991. – 368 с.

2. Вихри и волны [Текст] / Под ред. Ю.А. Ишлинского, Г.Г. Черного. – Новое в зарубежной науке. Механика. – М.: Мир, 1984. – 110 с.

3. Арсирий, В.А. Повышение эффективности оборудования с использованием FST-технологии [Текст] / В.А. Арсирий // Тр. Одесского политехн. ун-та. – Одесса: ОПУ, 2003. – Вып. 2. – С. 187 – 191.

4. Арсирий, Е.А. Модели и инструментальные средства поддержки принятия решений при диагностике процессов массопереноса в каналах энергетического оборудования [Текст] / Е.А. Арсирий, С.Г. Антошук // Интеллектуальные системы поддержки принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта. Материалы международной научно-технической конференции. – Т. 2 – Херсон: ХНТУ, 2011 – С. 129 – 132.

5. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик; под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

Поступила в редакцию 17.02.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., директор института тепловых и атомных электрических станций А.С. Мазуренко, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина.

### ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРИ КОМПЛЕКСНОМУ МОДЕЛЮВАННІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

*О.О. Арсірій, С.Г. Антошук, В.А. Арсірій, В.І. Кравченко*

Для підвищення надійності роботи енергетичного обладнання в умовах посилення екологічних норм і загального фізичного зносу нагнітачів пропонується технологія проектування елементів систем транспортування зі зниженими гідравлічними опорами. Основу технології проектування складає комплексне моделювання, що використовує інструментальні засоби фізичного і чисельного моделювання в поєднанні з можливостями інтелектуального аналізу даних. Наведено результати дослідження, що демонструють переваги технології проектування елементів систем транспортування складної форми на основі комплексного моделювання.

**Ключові слова:** надійність енергетичного обладнання, гідравлічні опори, комплексне моделювання, засоби інтелектуального аналізу.

### DATA MINING FOR COMPLEX SIMULATION TO IMPROVE RELIABILITY OF POWER EQUIPMENT

*E.A. Arsiriy, S. G. Antoshchuk, V.A. Arsiry, V.I. Kravchenko*

To improve the reliability of power equipment in a tightening of environmental regulations and general physical deterioration blower technology proposed design elements of transportation systems with a lower hydraulic resistance. The technology design of complex modeling, using the tools of physical and numerical modeling in conjunction with the possibilities of data mining. The results of research showing the advantages of the design technology of elements of transportation systems of complex shapes based on the complex modeling are given.

**Key words:** reliability of power equipment, hydraulic resistance, complex modeling, data mining tools.

**Арсирій Елена Александровна** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри економічної кібернетики і інформаційних технологій Одеського національного политехнического университета, Одесса, Украина.

**Антошук Светлана Григорьевна** – доктор техн. наук, проф, директор института компьютерных систем Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина.

**Арсирій Василь Анатольевич** – доктор техн. наук, проф, заведующий кафедрой механики жидкости и кондиционирования воздуха Одесской академии строительства и архитектуры, Одесса, Украина.

**Кравченко Владимир Иванович** – аспирант кафедры тепловых станций Одесского национального политехнического университета, заместитель технического директора по эксплуатации ЗАО МГЭС, Молдова.