

траектории движения и обоснования конструктивных параметров горизонтального классификатора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гейер В.Г. Гидравлика и гидропривод: учебник для вузов / В.Г.Гейер, В.С.Дулин, А.Н.Заря: – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1991. – 331с.
2. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения / Лященко П.В. – М.-Л.: Гос-топтехиздат, 1940.
3. Справочник по горнорудному делу. Т. 1. Открытые работы. – М.: Гос. научно-техн. издат. литерат. по горному делу, 1960.–926с.

Поступила в редколлегию 27.06.2013.

УДК (620.9 + 553.982.2):66(063):005:53

ТУЧИН В.Т., инженер  
ДОЛГОПОЛОВ И.С., к.т.н., доцент  
САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор  
ТИЩЕНКО Н.Т.,\* директор  
БЕЗШТАНЬКО Р.В. аспирант

Днепродзержинский государственный технический университет  
\*ООО Научно инновационное предприятие “ДІЯ”, г. Днепродзержинск

### СТРАТЕГИЯ И ТАКТИКА СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОБЛЕМЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ (ЧАСТЬ 1)

**Введение.** Решение проблемы энергоресурсосбережения неразрывно связано с проблемой повышения энергоэффективности. При этом стратегической концепцией энергоресурсосбережения является концепция системного анализа проблемы на разных иерархических уровнях: нано-, микро-, мезо-, макро- и мегамасштабе [1-4].

В предлагаемой работе рассматриваются результаты исследований по обобщению и развитию системного подхода и топологических методов в моделировании современных систем с целью получения комплексной (параметрической, эксергетической и эксергоэкономической) картины процессов преобразования вещества и энергии в них при стационарных и динамических режимах.

**Постановка задачи.** Основными задачами работы являются: формулирование теоретических основ, стратегических и методологических принципов системного анализа энергоресурсосбережения физико-технологических систем (ФТС); разработка критериев эксергетической эффективности ФТС, позволяющих провести анализ энергетической эффективности технологий и оборудования; качественный анализ физико-технологической системы и разработка её обобщенной эксергодиссипативной функции; введение в систему фундаментальных уравнений ФТС эксергетического и экономического аспектов; разработка формализма топологическоексергетического и топологическоексергоэкономического подхода при моделировании ФТС; представление функциональных операторов ФТС; определение устойчивости и идентификация ФТС; выбор термодинамических принципов управления энергоресурсосбережением ФТС. Методология решения этих задач рассмотрена в двух частях работы.

**Результаты работы.** В основе разрабатываемого метода повышения энергетической эффективности и энергоресурсосбережения в технических системах лежит прин-

цип системного подхода к анализу отдельного процесса технологии как сложной кибернетической системы, определяемой как физико-технологическая система (ФТС) [5, 6].

Это понятие раскрывает особенности реальной системы, необходимое для анализа энергоресурсосбережения. В нем учтено энергетическое взаимодействие системы с внешней средой; отражены фундаментальные законы сохранения (например, законы сохранения энергии, импульса, момента импульса, массы, электрического заряда); представлены информационные и экономические аспекты функционирования системы.

*Стратегия системного подхода в энергоресурсосбережении* – это принципы достижения конечной цели исследований и разработок – создания высокоэффективных энергоресурсосберегающих, экономически эффективных, экологически совершенных и устойчиво развивающихся ФТС. Эта стратегия отражена в разрабатываемых нами научных основах системного анализа энергоресурсосбережения, где в качестве базового инструмента реализации конкретных задач предложен топологоэксергетический метод анализа ФТС [5-8].

Системный подход к решению задач энергоресурсосбережения ФТС основан на последовательном выполнении семи стратегических принципов, которые систематизируют все этапы получения математического описания физико-технологической системы, отражающие параметрическую, эксергетическую и эксергоэкономическую стороны функционирования ФТС. Направление исследований заключается в конкретном представлении каждого из этапов стратегии, а также в создании топологоэксергетического и топологоэксергоэкономического методов описания ФТС, позволяющих вскрыть теоретическое единство параметрических, эксергетических и эксергоэкономических взаимосвязей. Три из семи принципов рассматриваются в первой части работы.

**1. Формулировка цели исследования, постановка задачи по реализации цели исследований и определение критериев эффективности решения задачи.**

В работе используются как известные критерии эксергетической эффективности, так и введенные в процессе разработки топологоэксергетического метода статические и динамические критерии эксергетической и экономической эффективности ФТС, основанные на использовании обобщенных эксергодиссипативной и эксергоэкономической диссипативных функций [9].

*1.1. Методологические подходы к анализу эффективности ФТС.* В системном анализе и, в частности, в теории эффективности в настоящее время существует два методологических подхода к анализу эффективности систем: **первый подход** основан на построении некоторого обобщенного показателя эффективности системы с использованием специальных процедур свертки её частных целевых показателей [10], либо определении функций полезности и задании предпочтения на множестве целевых показателей с использованием оценки важности, в том числе с помощью нечётких отношений; **второй подход** состоит в построении для исследуемой системы показателя, который характеризует её функциональные возможности с позиции достижения целей функционирования вышестоящей надсистемы.

Из теорем Геделя [10] следует важный методологический принцип, который формулируется как «**принцип внешнего дополнения**»: для получения истинного суждения ФТС необходимо рассмотреть внешнее дополнение к этой системе с расширенным набором операций логического вывода. Данный принцип следует считать основополагающим принципом системного анализа как современной методологии исследования сложных ФТС.

Существует ещё один подход, получивший название **многокритериальный** и использующий процедуру построения множества несравнимых (недоминируемых) вариантов систем по значению вектора целевых показателей [10]. Таким образом, сравнивая между собой три различных подхода, мы можем установить, что все они реали-

зуют принцип «внешнего дополнения» и с методологической точки зрения обеспечивают получение вполне объективной оценки эффективности исследуемой подсистемы. Выбор того или иного подхода зависит от характера задачи, уровня её информационного обеспечения и владения исследователем определёнными инструментальными средствами системного анализа.

*1.2 Принципы повышения энергетической эффективности для реализации энерго-сбережения ФТС.* Анализ энергоресурсосберегающих ФТС с энергетических позиций позволил обобщить подходы и сформулировать основные принципы повышения энергетической эффективности и энергосбережения ФТС [5]: 1 – *понижение требуемого эксергетического потенциала, диверсификация источников энергии*; 2 – *максимальное использование энергетического потенциала в ФТС*; 3 – *минимизация необратимостей разрабатываемых и функционирующих ФТС*; 4 – *использование синергетических эффектов в энергетической самоорганизации ФТС.*

*1.3 Критерии оценки эффективности энергоресурсосбережения.* Критерии эффективности оценки энергоресурсосбережения отражают характеристики целей, заданные количественно, и характеризуют качество функционирования ФТС. Эффективность энергоресурсосбережения можно оценить на основании следующих показателей:

1 – **ОТД – критерия**, позволяющего выразить эксергетические потери в долях от всех видов эксергий (механической, тепловой, электрической, химической и т.д.), поступающих на вход ФТС. При этом ОТД - критерий зависит от конструктивно-технологических параметров анализируемых и синтезируемых систем [5];

2 – **ТД – критерия**, показывающего отклонение реального производства потерь эксергии от суммы обобщенных модифицированных функций рассеяния Рэля [5];

3 – **аналитического выражения принципа локального экстремума** из обобщенной модифицированной функции Дьярмати [5]. Этот принцип является локальным дифференциальным принципом наименьшего рассеяния эксергии, который должен соблюдаться в каждой точке рассматриваемого пространства изменения состояния системы;

4 – **модифицированной формы интегрального принципа Дьярмати** – это принцип объединяет принципы наименьшего рассеяния эксергии и принцип наименьшего производства потерь эксергии [5];

5 – **коэффициентов интенсивности  $\eta_N$  и эксергетических потерь  $\eta_{II}$**  [5, 11]. Коэффициент интенсивности  $\eta_N$  показывает долю полезно затраченной эксергии  $N$  по отношению к сумме полезно затраченной и потерянной  $II$  эксергии в процессе. Коэффициент эксергетических потерь показывает отношение эксергии  $II$ , потерянной в системе, к эксергии на входе в систему  $E_{вх}$ ;

6 – **эффективность преобразования и транспорта энергии оценивают эксергетическим к.п.д.  $\eta_e$**  [5];

7 – **обобщенный критерий эффективности – к.п.д. по эксергии – нетто –  $\eta_{\Sigma}$**  [11];

8 – **значений временных динамических показателей:**  $T_p$  – времени выхода на режим;  $T_{ост}$  – времени останова;  $T_{п}$  – времени установления переходных процессов. В этих случаях решается задача обеспечения следующих условий:  $\min T_p$ ;  $\min T_{ост}$ ;  $\min T_{п}$ ;

9 – **критерия надёжности**, оценивающего надёжность ФТС при её разработке и эксплуатации, определяемого соотношением

$$R = T_1 / (T_1 + T_2),$$

где  $T_1, T_2$  – соответственно время работы ФТС без аварий и время аварийного ремонта;

10 – **критериев, характеризующих качество работы САУ ФТС:**

$$\min \sum (\bar{X} - X)^2; \min X_{\max},$$

где  $\bar{X}$ ,  $X$  – вектор параметров состояния системы, который необходимо поддерживать на требуемом уровне, и его действительное значение;  $X_{\max}$  – максимальное значение вектора  $\bar{X}$ .

11 – технико-экономических критериев эффективности ФТС:

а) критерий приведенных затрат  $\bar{Z}$ , определяемый зависимостью

$$\bar{Z} = \frac{Z}{W \cdot T} = \bar{\Theta} + \frac{\psi \cdot K}{W \cdot T},$$

где  $Z$  – суммарные затраты;  $W$  – производительность системы в единицу времени по конечному продукту;  $T$  – время работы установки в году;  $\bar{\Theta}$  – эксплуатационные затраты;  $\psi$  – коэффициент эффективности капиталовложений;  $K$  – капитальные затраты;

б) экономическая оценка энергосбережения ФТС может быть проведена с помощью коэффициента экономической эффективности энергоресурсосбережения, представляющего собой отношение прибыли (экономии) от проведения энергоресурсосберегающих мероприятий к стоимости их проведения [5]. Расчет этого показателя подразумевает учет не только прямой экономии энергии и ресурсов, но и сопутствующих эффектов, в том числе изменения объема вредных выбросов в окружающую среду за счет затрат на очистные мероприятия и экологические штрафы.

**2. Задание ограничений при достижении заданной цели в системном анализе ФТС (введение геометрической информации в топологоэксергетическом моделировании).**

*2.1. Конкретизация топологоэксергетического описания.*

Топологоэксергетическая структура связи представляет наглядное и компактное топологическое описание ФТС, однако для эффективного использования в алгоритмах переработки информации на ЭВМ такое описание должно содержать информацию о параметрах элементов эксергетических связанных диаграмм, начальных и граничных условиях, мощностях источников (стоков) субстанций. Для односвязных элементов в линейных системах вид параметра и его численное значение указываются в скобках под символом элемента, над ним или в отдельной таблице спецификации элементов [4, 8].

Для нелинейных систем здесь же может быть указан тип нелинейной функциональной зависимости.

Учёт информации о начальных значениях **e**- и **f**-переменных на топологоэксергетических структурах связи для **C**- и **I**-элементов соответствует принятой ранее индексации связей. Значение **e(0)** записывается над полустрелкой связи (или слева от неё при вертикальном положении), значение **f(0)** записывается под полустрелкой связи (или справа от её вертикального положения).

Специфика операторных элементов (**K, P, D, ∇, C<sub>п</sub>, C<sub>м</sub>, C<sub>ν</sub>**) требует учёта граничных условий [4, 8]. Численное решение краевых задач предполагает переход от операторных элементов к конечно-разностным аппроксимационным соотношениям или применение метода конечных элементов. В терминах топологоэксергетических структур связи это эквивалентно переходу от локальных диаграмм с инфинитезимальными операторными элементами к диаграммным сетям, построенным из элементов со сосредоточенными параметрами. При этом учёт граничных условий сводится к заданию условий для параметров тех элементов диаграммной сети, которые представляют границы области интегрирования краевой задачи. Формализация записи краевых условий на пограничных элементах диаграммной сети аналогична формализации записи начальных условий.

## 2.2. Метод автоматизированного учёта геометрической информации при топологоэксергетическом описании ФТС.

Учет геометрической информации о моделируемом объекте необходим при постановке граничных условий в областях сложной конфигурации; при описании пространственно-геометрических форм областей, занимаемых сплошной средой; при описании характера распределения источников (стоков) энергии, массы, импульса, заряда внутри системы и т.п. Разработана методика автоматизированного учета геометрической информации [4, 12], которая строится на основе компактности и наглядности метода логико-алгебраических операций и топологического принципа описания физико-технологических систем (ФТС). Это решает задачу повышения эффективности топологоэксергетического метода (метода графов связи) при описании ФТС, так как выбор и уточнение геометрической информации об объекте производится на стадии формирования уравнений математической модели. Такая информация обуславливается существующим или проектируемым аппаратурным оформлением технологического процесса.

## 3. Качественный анализ энергетической, эксергетической и экономической структур ФТС.

Стратегия системного подхода к моделированию, анализу и синтезу энергоресурс-собирающего процесса [5, 8] на третьем этапе определяет **качественный анализ структуры ФТС** и выделяет два направления: **смысловой**, т.е. заранее осмысливание изначальной информации о физико-химических и энергетических (эксергетических) особенностях процесса, и **математический**, т.е. качественный анализ структуры математических зависимостей, описывающих ФТС.

Рассмотрим **первое направление** качественного анализа структуры **ФТС**. Представляя ФТС как большую систему, можно реализовать её в виде совокупности элементов и связей. Формализация элемента осуществляется в виде отдельного физического, химического, энергетического (эксергетического) или др. эффекта. Причинно-следственные отношения цепью связывают между собой эффекты. Совокупность элементов и связей образует структуру системы. Установление структуры связей между различными эффектами ФТС означает вскрытие структуры физико-технологической системы [5-9]. Особенность исследуемых систем состоит в том, что совокупность явлений, составляющих ФТС, носит двойственную (детерминировано-стохастическую) природу, состоящую в наложении стохастических особенностей гидродинамики на процессы массо- и теплопереноса, химического и энергетического (эксергетического) взаимодействия. А это, в свою очередь, объясняется случайным взаимодействием фаз или случайным характером граничных условий в ФТС.

Визуализация, компактность и информационная ёмкость представления этого материала предполагает использование языка направленных графов. Для такого анализа строятся диаграммы взаимных влияний физических, энергетических (эксергетических), химических и др. эффектов ФТС, где узлам диаграммы соответствуют отдельные явления или эффекты в системе, а ориентированным дугам – соответствующие причинно-следственные связи между ними [3, 5-9].

С позиции энергоресурсосбережения важно знать, на что расходуются ресурсы и энергия (эксергия), подводимая к ФТС. Все характерные виды энергозатрат (эксергозатрат) на реализацию необратимых процессов в системе характеризует обобщённая эксергодиссипативная функция физико-технологической системы (**ОЭДФ ФТС**). Разложение **ОЭДФ ФТС** на движущие эксергетические усилия и потоки приведено в работах [6-9] и является основой при построении комплекса процедур автоматизированного формирования математических моделей в соответствии с топологоэксергетическим принципом формализации ФТС.

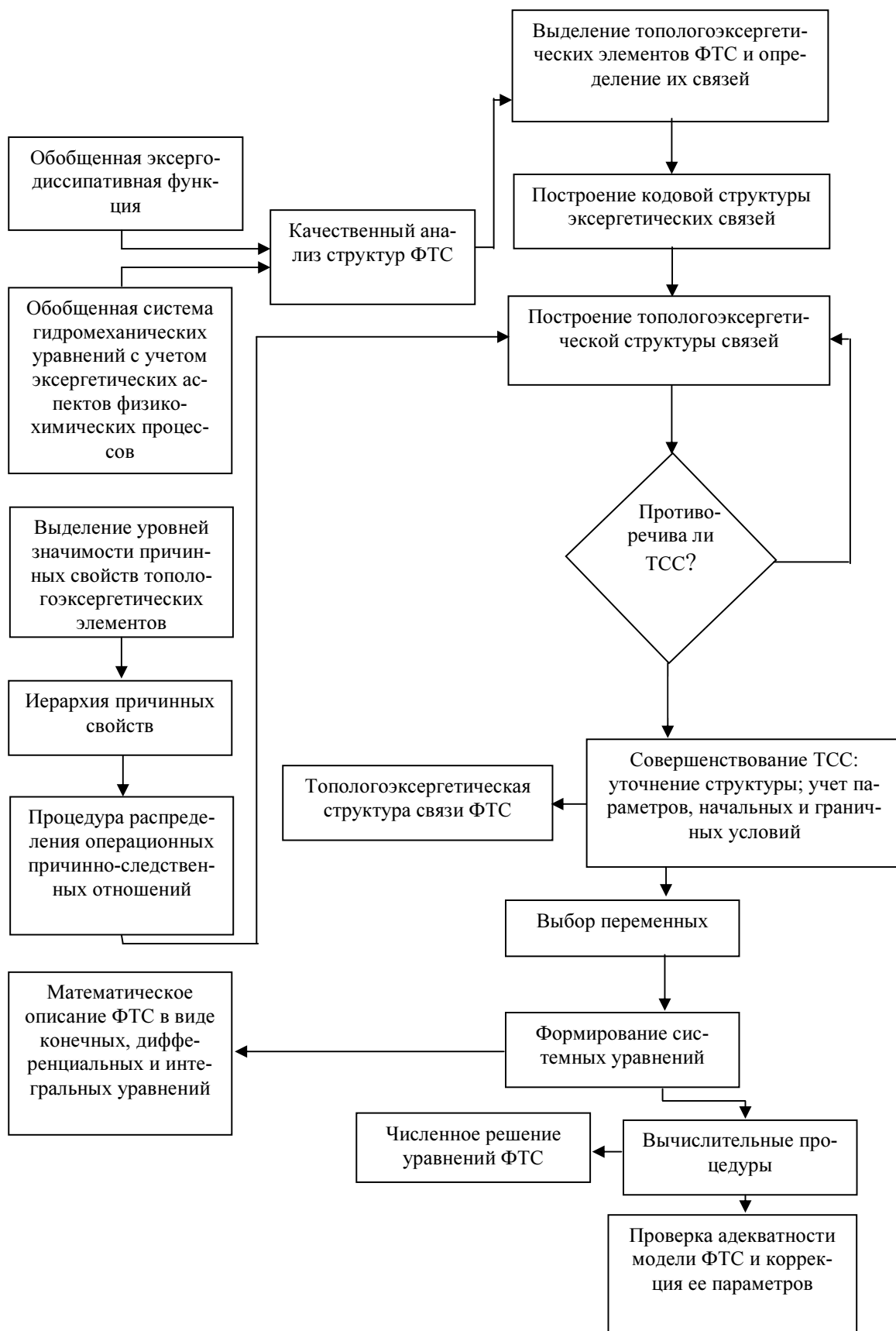


Рисунок 1 – Основной алгоритм формирования математической модели ТС

Эксергоэкономические обобщенные переменные усилия и потоки, участвующие в описании картины поведения эксергоэкономических потоков в системе, представлены в табл.1.

Таблица 1 – Обобщенные переменные в топологоэксергоэкономическом методе для всех форм энергии, представленных в работе [9]

Форма энергии	Обобщенная переменная усилия	Обобщенная переменная потока
Все формы энергии таблиц 1 и 2	Удельная цена эксергии потока $c^{эк}$ , (Грн/Дж)	Поток эксергии во времени $\Gamma^{эк}$ , (Дж/с)

Основные концепции рационального использования материальных и энергетических ресурсов при анализе и синтезе ФТС были определены ранее [13]. Они базируются на системном анализе проблемы на различных иерархических уровнях, а именно: нано-, микро-, мезо-, макро- и мегамасштабе.

Рассмотрим **второе направление** качественного анализа структуры ФТС – **математический аспект**. Обобщенная система гидромеханических уравнений с учётом физико-химических и эксергетических особенностей процессов, протекающих в анализируемом объекте, составляет основу структурного анализа ФТС. Такая замкнутая система уравнений сформулирована в работе [14] и может: а) вскрыть структуру движущих (эксергетических) сил и потоков, развивающихся в локальном объёме ФТС и отражающих специфику изменения энергии (эксергии) физико-химических процессов в нём; б) служить отправной точкой при переходе к математическому описанию инженерной задачи.

Базовой теоремой топологоэксергетического метода является теорема Телледжена, трансформированная авторами для разрабатываемого подхода [15]. Основные этапы формирования математической модели физико-технологической системы на основе диаграмм связи и топологоэксергетических структур связи представлены в алгоритме на рис.1.

#### Выводы.

1. В работе сформулированы теоретические основы системного анализа энергоресурсосбережения физико-технологических систем.
2. Разработаны стратегические принципы, систематизирующие все этапы получения математического описания физико-технологической системы, отражающие параметрическую, эксергетическую и эксергоэкономическую стороны функционирования ФТС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Основы интеграции тепловых процессов / [Р.Смит, Й.Клемеш, Л.Л.Товажнянский и др.]. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. – 456с.
2. Rosen M.A. Exergy and government policy: Is there a link? / M.A.Rosen // Exergy, an International Journal. – 2002. – №2. – P.224-226.
3. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В.Кафаров, И.Н.Дорохов. – М.: Наука, 1976. – 500с.
4. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации / В.В.Кафаров, И.Н.Дорохов. – М.: Наука, 1979. – 394с.

5. Долгополов И.С. Принципы энергосбережения физико-технологических систем и основные направления их реализации (топологоэксергетический подход) / И.С.Долгополов, В.Т.Тучин // Математичне моделювання. – 2007. – № 4(22). – С.45-51.
6. Долгополов И.С. Топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем / И.С.Долгополов, В.Т.Тучин // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 24. – С.116-118.
7. Долгополов И.С. Топологоэксергетический метод моделирования физико-технологических систем (ФТС) / Долгополов И.С., Тучин В.Т. // V Минский международный форум по тепло- и массообмену, 24-28 мая 2004 г.: труды. – Минск, 2004. – С.287-289.
8. Тучин В.Т. Основы формализма топологоэксергетического метода моделирования физико-технологических систем / В.Т.Тучин, И.С.Долгополов // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДГУ. – 2006. – С.202-212.
9. Эксергоэкономический анализ физико-технологических систем (топологоэксергетический подход). Часть 1, 2 / В.Т.Тучин, И.С.Долгополов, А.В.Садовой, А.М.Касимов // Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов: XVIII Междунар. науч.-практ. конф., 31 мая - 04 июня 2010 г.: сборник научных статей в 2-х. Т.1. / УкрГНТЦ «Энергосталь» – Харьков: Райдер, 2010. – С.242-251.
10. Буравлёв А.И. Принцип внешнего дополнения и его применение при оценке эффективности сложных систем / А.И.Буравлёв, Г.И.Горчица // Труды ВВИА им. проф. Н.Е.Жуковского. – 2009. – №32. – С.14-16.
11. Янтовский Е.И. Оценка эффективности энергетических объектов / Е.И.Янтовский, В.С.Варварский, А.П.Островский // Промышленная теплотехника. – 1984. – Т. 1, № 6. – С.95-101.
12. Тучин В.Т. Метод автоматизированного учета геометрической информации при топологическом моделировании физико-химических систем / Тучин В.Т., Дорохов И.Н., Горбачевич Л.Л. – М., 1978. – 15 с. – Деп. в ВИНТИ № 1274 - 78 (78), №9, б/о №540, 1978.
13. Устойчивое развитие физико-технологических систем (стратегия системного подхода, эксергия и окружающая среда). Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов / [В.Т.Тучин, И.С.Долгополов, А.В.Садовой и др.] // Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов: XVIII Междунар. науч.-практ. конф., 1 - 5 июня 2009 г.: сборник научных статей в 2-х. Т2. / УкрГНТЦ «Энергосталь». – Харьков: «Издательство Сага», 2009. – С.77-81.
14. Долгополов И.С. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС / И.С.Долгополов, А.В.Никулин, В.Т.Тучин // Системні технології. – 2003. – № 6(29). – С.64-68.
15. Энергетические аспекты топологоэксергетического метода описания физико-технологических систем (ФТС). Часть 1 / Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братута Э.Г., Тучина У.Н. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2004. – № 4. – С.81-89.

*Поступила в редколлегию 01.07.2013.*