

## Системный подход к энергосбережению физико-технологических систем (топологоэксергетический метод)

И.С. ДОЛГОПОЛОВ, В.Т. ТУЧИН

Днепродзержинский государственный технический университет

С энергетических позиций представлены принципы энергосбережения физико-технологических систем. Приведены основные направления реализации этих принципов. Представлены характеристики тополого-эксергетической и параметрической эффективности физико-технологических систем.

З енергетичних позицій представлено принципи енергозбереження. Наведено основні напрямки реалізації цих принципів. Представлено характеристики топологоексергетичної і параметричної ефективності фізико-технологічних систем.

The physico-technological systems saving energy principles are presented with energy position. The main trends to realization these principle are achieved. The criterions of topologoexergy and parametric efficiency of physico-technological systems are presented.

### Введение

В анализе и синтезе физико-технологических систем (ФТС) одним из главных вопросов является решение задач энергосбережения [1–5].

Несмотря на большие потенциальные возможности для энергосбережения существуют много факторов, препятствующих использованию эффективных с энергетической точки зрения процессов (рис. 1).



Рис. 1. Факторы, препятствующие использованию эффективных с энергетической точки зрения процессов

Энергосбережение дает одну из наиболее перспективных возможностей для промышленности - способствовать облегчению общей энергетической ситуации и соответствующие методы противодействия росту затрат энергии [10-23].

Для решения этих задач необходима разработка принципов и теоретических основ энергосбережения.

Большой вклад в решение задач энергосбережения внесли академики Долинский А.А., Кафаров В.В., член-корр. НАН Украины Фиалко Н.М., Басок Б.И., профессора Бродянский В.М., Товажнянский Л.Л., Лисенко В.Г., Дорохов И.Н., Коздоба Л.А., Огурцов А.П.,

А.Бежан, Д.Кэрнопп, Р.Розенберг, Г.Гранда, Г.Волл, Т.Гавстроп с сотрудниками [10-23].

В работах этих авторов рассмотрены ряд принципов энергосбережения, показана их практическая реализация на конкретных примерах. Развитие этого направления требует представления взаимосвязей конструктивно-технологических параметров с энергетическими параметрами ФТС, в частности отражения эксергетической сути рассматриваемых примеров, в том числе, вскрытие динамических аспектов энергосбережения.

В связи с этим актуальной задачей является разработка основных принципов энергосбережения и на-

правлений их реализации, представленных единой концепцией. В качестве рабочего инструмента при анализе разрабатываемых энергосберегающих структур (реализующих основные принципы энергосбережения) применяется топологоэксергетический подход [1-9], позволяющий получить как топологоэксергетические, так и аналитические формы их представления.

Стратегия этого системного подхода предусматривает:

- 1) формулирование цели исследования, постановку задачи по реализации этой цели и определение критерия эффективности поставленной задачи;
- 2) четкое задание ограничений при решении задач по достижению заданных целей;
- 3) проведение качественного анализа эксергетической структуры ФТС;
- 4) синтез функционального оператора физико-технологической системы;
- 5) идентификация и проверка адекватности операторов ФТС;
- 6) формализация процедур на основе топологоэксергетического принципа описания ФТС.

#### Постановка задачи

Целью работы является:

- 1) разработка основных принципов энергосбережения для анализа и синтеза ФТС;
- 2) формулирование основных направлений реализации этих принципов;
- 3) формирование критериев эффективности для анализа и синтеза ФТС при решении задач энергосбережения.

#### Методика исследований

Анализ ФТС с энергетических позиций позволил обобщить подходы и сформулировать основные **принципы энергосбережения**:

1. Повышение энергетического потенциала источников энергии.
2. Максимальное использование энергетического потенциала в ФТС.
3. Минимизация необратимостей разрабатываемых и функционирующих ФТС.
4. Использование синергетических эффектов в энергетической самоорганизации ФТС.

Алгебраические и топологоэксергетические структуры связи неравновесной термодинамики физико-технологических систем, наглядные правила их реализации позволяют сделать качественные и количественные прогнозы для практического энергосбережения, основанные на этих принципах. Теоретической базой для анализа необратимостей является разработанная авторами [2,3] обобщенная эксергодиссипативная функция физико-технологической системы (ОЭДФ ФТС). Эта функция определяет различные виды энергозатрат внутри системы на протекание необратимых процессов различной физической природы: тепловой, гидромеханической, электрической, химической, диффузионной и т.п.

Сформулируем следующие **направления энергосбережения**, реализующие эти принципы в ФТС:

- *Организация эффективных структур соединений.*
- *Использование регенерации эксергии.*
- *Дискретно-импульсный ввод эксергии.*

- *Когенерация.*
- *Многоступенчатое (многократное) использование эксергии.*
- *Гравитационный ввод эксергии.*
- *Совмещение процессов различной физической природы.*
- *Объединение теплотехнических объектов с компьютерным управлением процессами, которое базируется на знаниях в области теплотехники, электроники, микропроцессорной техники и информатики (мехатронный подход к ФТС).*
- *Применение нанотехнологий.*

В соответствии со стратегией системного топологоэксергетического подхода сформулируем критерии эффективности представления ФТС для анализа энергосбережения. Эти критерии отражают:

- 1) топологоэксергетическую эффективность;
- 2) параметрическую эффективность ФТС.

**Топологоэксергетическая эффективность** означает:

- а) достаточность элементов и связей, представляющих топологоэксергетическую структуру;
- б) представление источников и стоков эксергии в виде элементов, имеющих свою топологоэксергетическую структуру, или в виде постоянных или переменных во времени топологических связей;
- в) непротиворечивость причинно - следственных отношений;

г) визуализацию структуры ФТС и возможность трансформирования ее в различные формы описания – в форму дифференциальных уравнений состояния; в форму блок-схемы численного моделирования (или вычислительного моделирующего алгоритма); в форму передаточных функций по различным каналам (для линейных систем); в форму сигнальных графов.

**Параметрическая эффективность** предполагает:

- 1) увеличение полезных затрат эксергии  $N$  и уменьшения потерь эксергии  $P$  в ФТС ;
- 2) управляемость ФТС с точки зрения энергосбережения - это свойство ФТС достигать цели управления, требуемого уровня энергопотребления, оптимальных удельных эксергий, массовых расходов и т.д.;
- 3) минимизацию динамических параметров эффективности: времени выхода на режим  $T_p$ , времени останки  $T_{ост}$ , времени установления переходных процессов в системе  $T_{и}$ ;
- 4) устойчивость ФТС, которая связана с её управляемостью;
- 5) эмерджентность и интерэктность в ФТС;
- 6) надежность ФТС.

Рассмотрим, как понимается топологоэксергетическая эффективность в энергосбережении. Концепция эффективности потребления мощности, поступающей в систему и используемой в ней, является основной для энергосбережения. Поэтому в качестве базового инструмента реализации этой концепции является топологоэксергетическое представление ФТС, которое обеспечивает необходимый и достаточный уровень описания процессов преобразования мощности в ФТС.

Топологоэксергетическая эффективность ФТС обеспечивается системным уровнем описания физико-технологической системы. Основой этого подхода является отражение системы посредством многосвязанной

модели [7]. Разработанная элементная база этого метода [6] обеспечивает решение задач моделирования эксергетических взаимодействий в ФТС. Топологоексергетические структуры связи в каждой области системы обеспечивают в полном объеме отображение структуры взаимодействий эксергетических мощностей. Эти структуры представляют пространственные и временные отношения физико-технологических систем, то есть отношения такого рода, которые характеризуют состояния элементов в пространстве и во времени.

Базовой теоремой топологоексергетического метода является теорема Телледжена, трансформированная авторами для разрабатываемого подхода [8,9].

Для топологоексергетического связного графа  $\Gamma$ , состоящего из взаимосвязанных элементов и узлов справедливо, что

$$\sum_{i=1}^K e_i^T \cdot f_i = 0, \quad (1)$$

где  $e_i^T$  - транспонированные векторы обобщенных эксергетических усилий связей (переменные закона Кирхгофа для обозначения этих усилий: удельная эксергия и т.д.);  $f_i$  - векторы обобщенных потоков связей (переменные закона Кирхгофа для обозначения потоков: массовый расход и т.д.)  $i$ -ой - многосвязанной системы одновременно существующие в ФТС.

При этом выражение (1) отражает равенство нулю суммы подаваемых и потребляемых эксергетических мощностей.

Приведенные рассуждения справедливы независимо от природы элементов и входных величин анализируемой системы. Если ФТС имеет входные переменные, то можно записать уравнение:

$$\sum_{i=1}^m v_{xi} e_{vxi} \cdot f_{vxi} = \sum_{j=1}^n v_{nj} e_{vnj} \cdot f_{vnj}, \quad (2)$$

где для обозначения внутренних связей и элементов ФТС используется подструктурное обозначение «вн», а для обозначения входов «вх».

Поведение реальной ФТС зависит от эксергетических (энергетических) источников и стоков. Они имеют своё топологоексергетическое представление [6,7]. Этими элементами могут быть локальные химические или тепловые источники в физико-химических системах и т.д.

Причинность и энергетические взаимодействия связаны тесными соотношениями. При разработке топологоексергетических структур связи используются двойная и одинарная причинности, которые определяют для каждого элемента ФТС входные (независимые) и выходные (зависимые) связи, представляющие направление передачи эксергетической мощности [6]. Эти причинности являются определяющими при формировании причинно-следственных отношений в ФТС. Непротиворечивость причинно-следственных отношений в топологоексергетической структуре связи свидетельствует о правильном отражении физической картины процесса.

Визуализация структур ФТС и возможность трансформации их в различные формы описания позволила расширить область представления топологоексергетической информации и получить наглядный аппарат для алгоритмизации и формализации процедур решения задач анализа и синтеза ФТС с позиций энергосбережения [25-29].

Рассмотрим, что означает параметрическая эффективность в энергосбережении:

1. Увеличение полезных затрат эксергии  $N$  предполагает воздействие на конструктивно - технологические параметры системы с целью уменьшения необратимости процесса, то есть уменьшение потерь  $\Pi$  - означает повышение эксергетического КПД процесса и т.д.

2. Обеспечение управляемости ФТС с точки зрения энергосбережения реализуется путем использования систем автоматического управления (САУ) [24,25]. При проектировании САУ применяют методы анализа управляемости ФТС по критериям оценки эффективности энергосбережения. При этом основой для создания САУ является математическая модель ФТС, разработанная на базе топологоексергетической структуры связи, обеспечивающая системный подход при решении задач энергосбережения [26]. При построении САУ таким путем появляется возможность воздействовать на эффективность расходования эксергии в системе и реализовывать ведение процесса по критерию экономии энергии, обеспечивая оптимальный уровень удельных эксергий и массовых расходов.

3. Уменьшение времени выхода ФТС на режим –  $T_p$ , времени остановки –  $T_{ост}$ , времени установления переходных процессов в физико-технологической системе –  $T_n$  с временными параметрами, обеспечивающими снижение потерь эксергии в динамических режимах. Если считать, что производство потерь эксергии пропорционально скорости производства энтропии, то можно записать:

$$d\Pi = T_0 \cdot \frac{ds}{dt}, \quad (3)$$

где  $d\Pi$  - производство потерь эксергии;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $ds/dt$  – скорость производства энтропии.

Скорость производства энтропии – это функция конструктивно-технологических параметров системы, поэтому для обеспечения минимальных потерь эксергии в динамических режимах необходимо обеспечить такие конструктивно-технологические параметры, чтобы величина  $\Pi$  за период переходного процесса была минимальной.

4. Способность системы сохранять требуемые свойства ФТС – устойчивость, которая неразрывно связана с ее управляемостью. Так как ФТС - это динамическая система, следовательно, САУ должны обеспечивать их возвращение к состоянию желаемого устойчивого режима (соответствующего оптимальному уровню энергопотребления) в условиях возмущающих воздействий.

При исследовании ФТС возникают задачи анализа поведения систем в динамическом режиме с целью определения областей их устойчивой работы. Для оценки устойчивости ФТС можно использовать аппарат теории автоматического управления, в частности, теоремы устойчивости А.М. Ляпунова, алгебраические и частотные критерии устойчивости (критерии Рауса, Гурвица, Найквиста и Михайлова) [26].

5. Это характеристические свойства ФТС: **эмерджентность** – способность приобретать новые свойства, отличающиеся от свойств отдельных элементов, образующих эту систему, и **интерэктивность** - способность элементов, образующих систему, взаимодействовать между собой в процессе функционирования ФТС [26-31].

6. Способность ФТС в течение определенного интервала времени сохранять работоспособность (безотказность), т.е. обеспечивать надежность функционирования системы. Ненадежность ФТС приводит как к снижению эффективности системы (из-за частых простоев элементов ФТС резко увеличиваются материальные и энергетические затраты на получение требуемой продукции), так и к возможности возникновения аварий [32].

С позиций системного анализа рассматриваемый метод с присущей ему топологическо-энергетической и параметрической эффективностью позволяет получить в аналитической форме критерии оценки эффективности энергосбережения в анализируемой или синтезируемой ФТС.

#### КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Критерии эффективности оценки энергосбережения отражают характеристики целей, заданные количественно, и характеризуют качество функционирования ФТС. При этом целевые функции являются зависимостями между критериями эффективности и определяющими их параметрами. Сформулируем главные требования предъявляемые к критериям эффективности оценки энергосбережения ФТС – они должны:

- существенно зависеть от процесса функционирования системы;
- характеризовать ее эффективность.

Эффективность энергосбережения можно оценить на основании следующих показателей:

1. ОТД – критерия, определяемого как

$$\text{ОТД} = \frac{\text{ОЭДФ}}{\sum \dot{E}_{\text{вх}}}, \quad (4)$$

где ОЭДФ – обобщенная эксергодиссипативная функция анализируемой или синтезируемой ФТС, определяемая по формулам работ [ 2,3]:

$$\text{ОЭДФ} = \sum_{i=1}^{n=4} d_{\text{эвп}} + \sum_{m=1}^{m=1} d_{\text{эм}}, \quad (5)$$

где  $d_{\text{эвп}}$  - слагаемые, определяющие потери эксергии за счет энергообмена с внешней средой ;  $d_{\text{эм}}$  - потери эксергии за счет необратимых внутренних процессов внутри фаз и между фазами;  $\sum \dot{E}_{\text{вх}}$  -- эксергетическая мощность, подаваемая на вход ФТС.

ОТД – критерий отражает степень диссипации эксергии внутри ФТС и при взаимодействии ее с окружающей средой (внутренние и внешние потери). Этот критерий позволяет 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.

Интегрирование выражения (4) позволяет определить внешнюю и внутреннюю диссипацию эксергии ФТС в заданном временном интервале:

$$E_{\text{ОТД}} = \int_0^t \text{ОТД}(t) dt, \quad (6)$$

где  $E_{\text{ОТД}}$  - интегральный критерий внешней и внутренней диссипации (потерь) эксергии ФТС.

Для анализа ФТС целесообразно ввести критерий, характеризующий интенсивность потерь эксергии по отношению к используемой в ФТС эксергии. Этот критерий определяется зависимостью

$$\eta_{\text{п}}^3 = \frac{\text{ОЭДФ}}{\dot{E}_{\text{вх}} - \dot{E}_{\text{вых}}}, \quad (7)$$

где  $\dot{E}_{\text{вых}}$  – поток эксергетической мощности на выходе ФТС.

Критерий  $\eta_{\text{п}}^3$  показывает интенсивность диссипации эксергии рассматриваемой ФТС и отображается отношением ОЭДФ к используемой в ФТС эксергии. Интегрирование выражения (7) позволяет определить интенсивность внешней и внутренней диссипации эксергии в заданном временном интервале:

$$E_{\text{д}} = \int_0^t \eta_{\text{п}}^3(t) dt, \quad (8)$$

где  $E_{\text{д}}$  - интегральный критерий интенсивности потерь эксергии.

2. ТД – критерия

$$\text{ТД} = \epsilon - (\Phi + \Psi), \quad (9)$$

где  $\epsilon \equiv \text{ОЭДФ} \equiv \sum_{i=1}^N f_i \cdot e_i$  - производство потерь эксергии;

$\Phi$  и  $\Psi$  – обобщенные модифицированные функции рассеяния Рэлея;

$$\Phi \equiv \Phi(f, f) \equiv \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^N R_{ik} \cdot f_i \cdot f_k \geq 0, \quad (10)$$

$$\Psi \equiv \Psi(e, e) \equiv \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^N L_{ik} \cdot e_i \cdot e_k \geq 0, \quad (11)$$

где  $e_i$  – обобщенное  $i$ -ое эксергетическое усилие (удельная эксергия);  $f_i$  - массовый  $i$ -й расход;  $L_{ik}$  - коэффициент проводимости ;  $R_{ik}$  - коэффициент сопротивления.

ТД - критерий (9) показывает отклонение реального производства потерь эксергии от суммы обобщенных модифицированных функций рассеяния Рэлея (10) и (11).

Получим аналитическое выражение принципа локального экстремума из обобщенной модифицированной функции Дьярмати (9). Этот принцип отражает наименьшее рассеяние эксергии в локальной форме.

Представим этот принцип, варьируя (9) через потоки.

Этот принцип можно сформулировать в следующем виде:

$$\{\epsilon(f, e) - \Phi(f, f)\}_e = \max, \quad (12)$$

где  $f$  - обобщенный поток;  $e$  - обобщенное эксергетическое усилие.

При варьировании (9) через потоки получим:

$$\delta \left\{ \epsilon(e_i \cdot f_i) - \Phi(f_i, f_k) \right\}_e = \delta \left( \sum_{i=1}^m e_i f_i - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i,k=1}^N R_{ik} \cdot f_i \cdot f_k \right)_e = 0, \quad (13)$$

Далее (13) представим так

$$\begin{aligned} & \delta \left( \sum_{i=1}^m e_i f_i - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i,k=1}^N R_{ik} \cdot f_i \cdot f_k \right)_e = \\ & = \sum_{k=1}^m \left\{ \frac{\partial (e_i \cdot f_i)_e}{\partial f_k} - \frac{\partial [\Phi(f_i, f_k)]}{\partial f_k} \right\} = \\ & = \sum_{k=1}^m \left( f_k - \frac{\partial \Phi}{\partial f_k} \right) \cdot \delta f_k = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

Равенство нулю вариации является необходимым условием экстремума, так как потенциал рассеяния  $\Phi$  по (10) является положительно определенной функцией, поэтому экстремум может быть только максимумом

$$(\epsilon - \Phi)_\epsilon = \max, \quad (15)$$

Если варьировать (9) через эскергетические усилия, то получим, что

$$\delta(\epsilon - \Phi)_f = \sum_{k=1}^m \left( f_k - \frac{\partial \Psi}{\partial e_k} \right) \cdot \delta e_k = 0, \quad (16)$$

или

$$(\epsilon - \Psi)_f = \max, \quad (17)$$

Представим локальную универсальную форму принципа наименьшего рассеяния эскергии.

Если одновременно варьировать (9) по потокам и по эскергетическим усилиям, то после преобразований получим:

$$\delta\{\epsilon(f, e) - [\Psi(e, e) + \Phi(f, f)]\} = 0, \quad (18)$$

и

$$\epsilon - (\Psi + \Phi) = \max. \quad (19)$$

Этот принцип является локальным дифференциальным принципом наименьшего рассеяния эскергии, который должен соблюдаться в каждой точке рассматриваемого пространства изменения состояния системы.

Если проанализировать справедливость этого принципа для всего рассматриваемого континуума, то в модифицированной форме интегральный принцип Дьярмати имеет вид:

$$\int_V [(\Psi + \Phi) - \epsilon] dV = \min, \quad (20)$$

Этот принцип объединяет принципы наименьшего рассеяния эскергии и принцип наименьшего производства потерь эскергии.

3. Коэффициентов интенсивности  $\eta_N$  и эскергетических потерь  $\eta_\Pi$  [33].

Коэффициент интенсивности  $\eta_N$  показывает долю полезно затраченной эскергии  $N$  по отношению к сумме полезно затраченной и потерянной  $\Pi$  эскергии в процессе:

$$\eta_N = \frac{N}{N + \Pi}, \quad (21)$$

Коэффициент эскергетических потерь показывает отношение эскергии  $\Pi$ , потерянной в системе, к эскергии на входе в систему  $E_{вх}$ :

$$\eta_\Pi = \frac{\Pi}{E_{вх}}, \quad (22)$$

4. Эффективность преобразования и транспорта энергии оценивают эскергетическим к.п.д.  $\eta_e$  [33,34]:

$$\eta_e = \frac{ex_0}{ex_\Pi}, \quad (23)$$

где  $ex_0$  – отведенная в единицу времени эскергия из ФТС;  $ex_\Pi$  – подведенная в единицу времени эскергия в ФТС.

5. Обобщенный критерий эффективности – к.п.д. по эскергии – нетто –  $\eta_\Sigma$  [34]

$$\eta_\Sigma = \frac{ex_0 \cdot t_p}{ex_\Pi \cdot t_p + E_{yc} + E_{xb}}, \quad (24)$$

где  $E_{yc}$  – эскергия, затраченная на создание установки;  $E_{xb}$  – эскергия, затраченная на эксплуатацию и ремонт ФТС за время  $t_p$ .

6. Значений временных динамических показателей:  
 $T_p$  – времени выхода на режим;

$T_{ост}$  – времени остановки;

$T_n$  – времени установления переходных процессов.

В этих случаях решается задача обеспечения следующих условий:

$$\min T_p \quad (25)$$

$$\min T_{ост}; \quad (26)$$

$$\min T_n \quad (27)$$

7. Критерия надёжности, оценивающего надёжность ФТС при её разработке и эксплуатации и определяемого соотношением:

$$R = \frac{T_1}{(T_1 + T_2)}, \quad (28)$$

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

8. Критериев, характеризующих качество работы САУ ФТС:

$$\min \sum (\bar{X} - X)^2; \quad (29)$$

$$\min X_{max}, \quad (30)$$

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

9. Техничко-экономических критериев эффективности ФТС:

а) критерий приведённых затрат  $\bar{3}$ , определяемый зависимостью

$$\bar{3} = \frac{3}{W \cdot T} = \bar{3} + \frac{\Psi \cdot K}{W \cdot T}, \quad (31)$$

где  $3$  – суммарные затраты;  $W$  – производительность системы в единицу времени по конечному продукту;  $T$  – время работы установки в году;  $\bar{3}$  – приведённые эксплуатационные затраты;  $\Psi$  – коэффициент эффективности капиталовложений;  $K$  – капитальные затраты.

б) экономическая оценка энергосбережения ФТС может быть проведена с помощью коэффициента экономической эффективности энергосбережения, представляющей собой отношение прибыли (экономии) от проведения энергосберегающих мероприятий к стоимости их проведения [35]. Расчет этого показателя подразумевает учет не только прямой экономии энергии, но и сопутствующих эффектов, в том числе изменения объёма вредных выбросов в окружающую среду за счет затрат на очистные мероприятия и экологические штрафы.

### Выводы

1. На основании системного анализа физико-технологических систем с энергетических позиций сформулированы базовые принципы энергосбережения ФТС и направления реализации этих принципов.
2. Сформулированы понятия топологоэскергетической и параметрической эффективности ФТС.
3. Представлены аналитические выражения критериев энергетической эффективности ФТС.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэскергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем // Промышленная теплотехника. - 2003. - т. 25, № 24. - С. 116 – 118.
2. Долгополов И. С., Тучин В. Т. Обобщенная эскергодиссипативная функция как основа тополого-

- эксергетического анализа физико-технологических систем // Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. - Днепропетровск: НМетАУ, 2002.- т. 5. С. 67 – 71 .
3. Братуга Э.Г., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Тополого-эксергетический подход к оценке энергозатрат в физико – технологических системах // Интегровані технології та енергозбереження . –2000 -№4. С 20 – 27.
  4. Долгополов И. С., Тучин В.Т. Элементная база топологоэксергетического метода анализа физико - технологических систем (ФТС). Часть 1// Математичне моделювання.- 2005.- № 1.- С. 29 – 36.
  5. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Роменская Н.А. Топологоэксергетический подход к моделированию физико-технологических систем, осложненных химическими реакциями // Математичне моделювання.- 2005, №2 (14).- С. 18-23
  6. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод моделирования физико-технологических систем. 5 Минский международный форум по тепло- и массообмену 24-28 мая 2004 . Тезисы докладов и сообщений, том 2. Минск, 2004. С. 286-287 и доклад на CD (труды 5 Минского форума).
  7. Долгополов И.С., Никулин А.В., Тучин В.Т. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС// Системні технології –2003, № 6(29). С.64-68
  8. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братуга Э.Г., Тучина У.Н. Энергетические аспекты топологоэксергетического метода анализа физико – технологических систем (ФТС) - часть 1 // Интегровані технології та енергозбереження. – 2004. - № 4. – С.81 – 89.
  9. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братуга Э.Г., Тучина У.Н. Энергетические аспекты топологоэксергетического метода анализа физико – технологических систем (ФТС)- часть 2 // Интегровані технології та енергозбереження. – 2005. - № 1. – С. 36 – 42.
  10. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие / Бродянский В. М., Верхивкер Г. П., Карчев Я.Я. и др. : Под ред. Долинского А. А. , Бродянского В.М. АН УССР. Ин – т технической теплофизики . – Киев : Наукова думка. 1991, С. 360.
  11. Долинский А.А. , Басок Б.И., Гулый И.С., Накорчевский А.И., Шурчкова Ю.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях. Киев. ИТТФ НАНУ, 1996. - 206 с.
  12. Фиалко Н.М. Когенерационные технологии и повышение эффективности использования топлива в энергетическом оборудовании. Труды 1 в Украине международной конференции «Когенерация в промышленности и коммунальной энергетике». Киев, 18-20 октября 2004 г. (на CD)
  13. Смит Р., Клемеш Й., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульянов Л.М. Основы интеграции тепловых процессов. Харьков: НТУ «ХПИ», 2000.–456 с.
  14. Каневец Г.Е., Вукович Л.К., Никульшин В.Р. Об оптимальном распределении эксергетических потерь// – Изв. высших учеб. заведений СССР. Энергетика, - 1979. - №9.-С. 112 – 116
  15. Коздоба Л.А. Критерии эффективности тепловых и комплексных тепловых систем // Промышленная теплотехника.- 2000.- Т. 22, № 5-6. –С. 22 -28.
  16. Кафаров В.В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии.- М.,: Наука, 1976. -500 с.
  17. Кафаров В.В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. Топологический принцип формализации.- М.: Наука, 1979.- 394 с.
  18. Bejan A. Advanced Engineering Thermodynamics.- New York.:Wiley.- 1997.
  19. Bejan A., Tsatsaronis G., Moran M. Thermal Design and Optimization.- New York.:Wiley.- 1996 .
  20. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладьгичев М.Г. Хрестоматия энергосбережения.: Справочное издание: В 2-х книгах. Книга 1/ Под ред. В.Г.Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2003 -688 с.
  21. Rosenberg R.C., Karnopp D. C. Introduction to Physical System Dynamic. : Mc.Grow – Hill Inc. 1983/ -420 p.
  22. Gawthrop P.I. , Smith L.S. Metamodelling : Bond Graphs and Dynamic Systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.I, 1996.
  23. Огурцов А.П., Залищук В.В. Энергия и энергосбережение. ГНПП « Системные технологии». : Днепропетровск, 2001.- 859 с.
  24. Дорохов И.Н., Кафаров В.В., Тучин В.Т. и др.. Синтез математического описания элементов систем автоматического управления методом диаграмм связи // Изв. АН Армянской ССР.-т. XXXI. №6- 1978. - С. 47-54.
  25. Дорохов И.Н., Тучин В.Т. Метод автоматизированного вывода передаточных функций и частотных характеристик физико- химических систем на основе диаграмм связи // “Депон. рук.” ВИНТИ. –1979, №2.-3296-78(79), б/о, №219.
  26. Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Тучин В.Т. Применение алгебры логики в задаче устойчивости гидродинамики фонтанирующего слоя // “Депон. рук.” ВИНТИ. –1979, №1.-3097-78(79), б/о, №155.
  27. Долгополов И.С., Словиковский П.А., Тучин В.Т. Топологоэксергетический подход к анализу теплообменного аппарата. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины – Днепропетровск: «Пороги», том 12, 2005.- С.183-194
  28. Долгополов И.С., Носков В.А., Чернышев А.В., Тучин В.Т., Минаева А.С. Топологоэксергетический анализ параметров агрегата для сушки промышленных отходов (сообщение 1) // Металлургическая и горноурядная промышленность №5, 2005, с 84-89.
  29. Минаева А.С., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический анализ сушильной камеры трубы-сушилки (стационарный режим) // Математичне моделювання.- 2004, №2 (12).- С. 55-61.
  30. Тучин В.Т., Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Белоус А.И. Новый метод моделирования гидродинамики в аппаратах фонтанирующего слоя с помощью диаграмм связи. // Доклады АН СССР. -1979.-Т.244, №3. –С. 79-83.
  31. Кафаров В.В., Тучин В.Т., Дорохов И.Н. и др. Учет эффекта газопроницаемости при формировании модели гидродинамики фонтанирующего слоя // Гидродинамика и явления переноса в двухфазных дисперсных системах. Межвузовский сборник. Иркутск: ИПИ, 1979.- С. 3-17.
  32. Райншке К. Модели надежности и чувствительности систем.. –М.: Мир. 1979.- 452 с.
  33. Янтовский Е.И. Энергия – нетто // Промышленная энергетика.-1985, №1.- С. 33-37.
  34. Янтовский Е.И., Варварский В.С., Островский А.П. Оценка эффективности энергетических объектов // Промышленная теплотехника.-1984.- т.1, №6.-С. 95-101.
  35. Беленький А.М., Дубинский М.Ю., Попова А.И. Повышение энергоэффективности металлургических печей. // Сборник тезисов международной научно- практической конференции «Рациональное использование природного газа в металлургии», Московский государственный институт стали и сплавов (Технологический университет), Москва 13-14 ноября 2003 г.- С. 51-54.

