

ТОПОЛОГОЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ (ФТС)

И.С. Долгополов, В.Т. Тучин

Днепродзержинский государственный технический университет, Украина

Представлена идеология разрабатываемого топологоэксергетического метода описания физико-технологических систем, которая объединяет достоинства эксергетического и топологического (диаграмм связи) принципов моделирования. Рассмотрены основы стратегии топологоэксергетического метода, являющегося теоретической базой анализа энергосбережения в ФТС. Приведена математическая формулировка эксергодиссипативной функции с использованием понятий обобщенных эксергетических усилий и потоков, позволяющая применить метод диаграмм связи для моделирования потерь эксергии в физико-технологической системе в стационарных и нестационарных режимах её функционирования. Сформулированы критерии оценки термодинамической эффективности ФТС.

Ключевые слова

Эксергия, топология, физико-технологическая система, модель, энергосбережение.

Условные обозначения

ρ - плотность двухфазной многокомпонентной среды, ρ_1 - усредненная по объему плотность фазы 1; ρ_2 - усредненная по объему плотность фазы 2; τ_1^{ql} - поток вязких напряжений в сплошной фазе; e_1^{ql} – тензор скоростей деформаций несущей фазы; \mathbf{f}_{12} – поток силы механического взаимодействия между фазами; $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ – среднemasовые скорости несущей и дисперсной фаз; χ_1, χ_2 – доли диссипируемой кинетической энергии смеси из-за силового взаимодействия составляющих, переходящие во внутреннюю энергию 1 и 2 фазы; T_0 – температура окружающей среды; T_1 – температура несущей фазы; T_2 – температура дисперсной фазы; \mathbf{q}_1 - приток теплоты через поверхность, ограничивающую систему, к фазе 1; \mathbf{q}_2 - приток теплоты через поверхность, ограничивающую систему, к фазе 2; q_{12} – интенсивность контактного теплообмена между фазами (потока теплоты); \mathbf{q}_1^* – поток теплоты внутри несущей фазы; \mathbf{q}_2^* – поток теплоты дисперсной фазы; \mathbf{j}_{1k} – диффузионный поток k-го компонента в фазе 1; \mathbf{j}_{2k} – диффузионный поток k-го компонента в фазе 2; $\nabla\mu_{1k}$ – градиент химического потенциала k-го компонента в несущей фазе; \mathbf{F}_{1k} – внешние массовые силы, действующие на частицы k-го компонента в первой фазе; $\nabla\mu_{2k}$ – градиент химического потенциала k-го компонента в дисперсной фазе; \mathbf{F}_{2k} – внешние массовые силы, действующие на частицы k-го компонента во второй фазе; V_{1r} – химическое сродство r-й реакции в несущей фазе; V_{2r} – химическое сродство r-й реакции в дисперсной фазе; $I_{(1r)}$ – скорость r-й химической реакции в фазе 1; $I_{(2r)}$ – скорость r-й химической реакции в фазе 2; $J_{k(12)}$ – поток k-го компонента через границу раздела фаз в направлении 1→2; $J_{k(21)}$ – поток k-го компонента через границу раздела фаз в направлении 2→1; μ_{1k}, μ_{2k} – химические потенциалы k-го компонента в несущей и дисперсной фазах соответственно; $i_{2k,s}$ – энтальпия k-го компонента в дис-

персной фазе; $i_{1k,s}$ – энтальпия k -го компонента в несущей фазе; v_{12} – относительная скорость фазы 1 по отношению к фазе 2; v_{21} – относительная скорость фазы 2 по отношению к фазе 1; Q_1, Q_2 – мощность внешних тепловых источников.

Введение

Повышение эффективности использования энергии при разработке новых и исследовании существующих технологий возможно при дальнейшем развитии теоретической базы и инженерных методов анализа энергосбережения.

В последние десятилетия развивается эксергетический метод анализа технических систем [1-3], основанный на использовании принципов термодинамики и элементов экономического анализа для оценки энергопотребления. Этот метод дает возможность представить взаимосвязи различных видов энергии в рассматриваемых технических системах только лишь с позиций анализа их эксергетических к.п.д. При этом, указанный метод позволяет описывать поведение рассматриваемых систем в динамике только для простых случаев (неразвитых топологических структур).

Характерной чертой современных технологий является развитая структура энергетических потоков в технических системах. При анализе и проектировании таких систем важную роль играет описание их поведения при нестационарных состояниях, т.е. при пусках, остановках, колебательных и пульсационных процессах. Неустановившиеся режимы в ряде случаев являются нормальными режимами функционирования технических объектов. Созданные и разрабатываемые в настоящее время высокоинтенсивные энергосберегающие технологии и оборудование [4] предусматривают дискретно-импульсный ввод энергии в техническую систему, а это, в свою очередь, требует дальнейшего развития эксергетического метода с точки зрения расширения его возможностей в описании поведения технических объектов с учетом нестационарности протекающих процессов в них.

Постановка задачи

Современным инструментом исследования и проектирования сложных физико-технологических систем является системный анализ, одним из мощных средств которого – топологический (диаграмм связи) метод описания технических систем, который позволяет сравнительно просто определять математические модели динамических систем, описывающих гидродинамику, тепломассообмен и др. [5,6].

Преимущества, которые свойственны эксергетическому и топологическому (диаграмм связи) методам, целесообразно объединить в виде топологическo-эксергетического подхода к анализу систем, в которых одновременно используются различные виды энергии.

В основе топологическo-эксергетического метода лежит принцип системного подхода к анализу отдельного процесса технологии как сложной кибернетической системы, так называемой физико-технологической системы (ФТС). В различных источниках приведены определения системы, которые имеют те или иные недостатки, и даже наиболее емкое определение физико-химической системы (ФХС) [5], которое использовалось при топологическом моделировании, по своей сути не отражало эксергетического аспекта функционирования системы. Поэтому введение понятия физико-технологическая система (ФТС) обусловлено необходимостью дальнейшего совершенствования и развития методов системного анализа реальных объектов.

Под физико-технологической системой (ФТС) понимаем объект, обладающий сложным внутренним строением, большим числом составных частей и элементов (самостоятельных и условно неделимых единиц), взаимодействующих между собой и окружающей сре-

дой, между которыми существует материальная, энергетическая и информационная связь, при этом взаимодействующие среды распределены в пространстве и переменны во времени, где связи и элементы могут иметь источники (стоки).

Это понятие полнее раскрывает особенности реальной системы, так как в нем:

- 1) учтено взаимодействие системы с внешней средой, позволяющее использовать эксергетический метод анализа;
- 2) отражен информационный аспект функционирования системы, позволяющий применить информационно-термодинамический метод анализа системы.

Такой подход к определению ФТС дает возможность выявить направления энерго-сбережения в рассматриваемой системе, отразить экологический и экономический аспекты функционирования системы.

Основные цели топологэксергетического принципа моделирования ФТС следующие:

1. Создание метода описания преобразования энергии в ФТС, совмещающего простоту структурного представления и наглядность, логическую стройность и эвристическую силу смыслового и математического аспектов, формализацию, алгоритмизацию и автоматизацию процедур вывода системных уравнений и решения их на ЭВМ.
2. Формирование топологэксергетического подхода как единой базы данных при системотехническом анализе и проектировании энергосберегающих ФТС.
3. Создание модульного принципа описания ФТС, обеспечивающего координацию модулей при их агрегировании в энергосберегающую подсистему посредством формализации и учета причинно-следственных отношений между отдельными явлениями и эффектами.
4. Удобное объединение модулей в конфигурации систем, разрабатывая при этом принципы автоматизированного моделирования энергосберегающих ФТС.
5. Создание инженерных методик построения математических описаний сложных моделируемых объектов для конкретных задач анализа и проектирования энергосберегающих ФТС в режиме диалога с ЭВМ.
6. Разработку методики оценки энергетической эффективности действующих и проектируемых физико-технологических систем на основе топологэксергетического подхода.

Методика исследования

Стратегия системного подхода в энергосбережении – это принципы достижения конечной цели исследований и разработок – создания высокоэффективных энергосберегающих физико-технологических систем. Эта стратегия отражена в разрабатываемом нами топологэксергетическом методе анализа физико-технологических систем [7-16]. Стратегия рассматриваемого метода предусматривает:

1. Формулировку цели исследования, постановку задачи по реализации этой цели и определения критерия эффективности решения задачи.
2. Задание ограничений при достижении заданной цели.
3. Проведение качественного анализа энергетической структуры ФТС.
4. Синтез функционального оператора ФТС на основе топологэксергетического принципа описания физико-технологических систем.
5. Проверка адекватности и идентификация операторов рассматриваемой ФТС

Рассмотрим математический аспект анализа ФТС с позиций системного подхода для формирования обобщенной эксергодиссипативной функции, являющейся основной топологэксергетического метода. Представим наиболее сложный случай формулирования обобщенной эксергодиссипативной функции (ОЭДФ), при котором анали-

зируется многокомпонентная двухфазная сжимаемая дисперсная смесь, в которой протекают процессы тепло - и массопереноса совместно с химическими реакциями:

$$\begin{aligned}
 \rho \frac{D\epsilon}{Dt} = & T_0 \frac{\rho_1 \cdot Q_1}{T_1} + T_0 \frac{\rho_2 \cdot Q_2}{T_2} - T_0 \cdot \nabla \left[\frac{1}{T_1} \cdot \left(\mathbf{q}_1 - \sum_{k=1}^n \mu_{1k} \cdot \mathbf{j}_{1k} \right) \right] - T_0 \cdot \nabla \left[\frac{1}{T_2} \cdot \left(\mathbf{q}_2 - \sum_{k=1}^n \mu_{2k} \cdot \mathbf{j}_{2k} \right) \right] + \\
 & + T_0 \frac{\tau_1^{ql} \cdot e^{ql}}{T_1} + T_0 \cdot \mathbf{f}_{(12)} \cdot (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2) \cdot \left(\frac{\chi_1}{T_1} + \frac{\chi_2}{T_2} \right) + T_0 \cdot q_{(12)} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) + T_0 \cdot \left[-\mathbf{q}_1^* \cdot \nabla \left(\frac{1}{T_1} \right) \right] + \\
 & + T_0 \cdot \left[-\mathbf{q}_2^* \cdot \nabla \left(\frac{1}{T_2} \right) \right] + T_0 \cdot \left[-\frac{1}{T_1} \cdot \sum_{k=1}^n \mathbf{j}_{1k} \cdot \left[\left(\nabla \mu_{1k} \right)_1 - \mathbf{F}_{1k} \right] \right] + T_0 \cdot \left[-\frac{1}{T_2} \cdot \sum_{k=1}^n \mathbf{j}_{2k} \cdot \left[\left(\nabla \mu_{2k} \right)_2 - \mathbf{F}_{2k} \right] \right] + \\
 & + T_0 \cdot \sum_{k=1}^n J_{k(12)} \cdot \left[\left(\frac{\mu_{1k}}{T_1} - \frac{\mu_{2k}}{T_2} \right) + \frac{(\mathbf{v}_{(12)} - \mathbf{v}_2)^2}{2T_2} - \frac{(\mathbf{v}_{(12)} - \mathbf{v}_1)^2}{2T_1} + i_{2k,s} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \right] + \\
 & + T_0 \cdot \sum_{k=1}^n J_{k(21)} \cdot \left[\left(\frac{\mu_{2k}}{T_2} - \frac{\mu_{1k}}{T_1} \right) + \frac{(\mathbf{v}_{(21)} - \mathbf{v}_1)^2}{2T_1} - \frac{(\mathbf{v}_{(21)} - \mathbf{v}_2)^2}{2T_2} + i_{1k,s} \cdot \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] + \\
 & + T_0 \cdot \left[-\frac{1}{T_1} \cdot \sum_{r=1}^N B_{1r} I_{(1r)} \right] + T_0 \cdot \left[-\frac{1}{T_2} \cdot \sum_{r=1}^N B_{2r} I_{(2r)} \right] \tag{1}
 \end{aligned}$$

$$B_{ir} = \sum_{k=1}^n \mu_{ik} \cdot v_{k(ir)}, \quad \mathbf{q}_i^* = \mathbf{q}_i - \sum_{k=1}^n i_{ik} \cdot \mathbf{j}_{ik}; i=1,2$$

Полученная зависимость (1) представляет собой обобщенную эксергодиссипативную функцию анализируемой ФТС.

Уравнение (1) представим в виде суммы двух слагаемых

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{D\epsilon^{(эв)}}{Dt} + \frac{D\epsilon^{(э)}}{Dt} = \sum D^* = d_{эв} + d_{э}, \tag{2}$$

где первое слагаемое определяет изменение эксергии смеси за счет энергообмена с внешней средой (первые четыре слагаемых в правой части (1)), а второе $\frac{D\epsilon^{(э)}}{Dt}$ определяет потери эксергии за счет необратимых внутренних процессов внутри фаз и между фазами (последние одиннадцать слагаемых).

Обобщенная эксергодиссипативная функция ФТС $\sum D^*$, составленная из пятнадцати слагаемых правой части выражения (1), представляет собой сумму произведений термодинамических сил e на термодинамические потоки f

$$\Sigma D^* = \sum_{n=1}^{n=4} d_{\text{эв}n} + \sum_{m=1}^{m=11} d_{\text{э}m} = e_{\text{эв}1} \cdot \dot{e}_{\text{эв}1} + \dots + e_{\text{эв}4} \cdot \dot{f}_{\text{эв}4} + e_{\text{э}1} \cdot \dot{f}_{\text{э}1} + \dots + e_{\text{э}11} \cdot \dot{f}_{\text{э}11} \quad (3)$$

Такое представление обобщенной эксергодиссипативной функции позволяет применить для моделирования ФТС топологэксергетический подход. В качестве переменных для моделирования взяты переменные, представлены в таблице 1.

Таблица 1- Эксергетические переменные для топологэксергетического моделирования механических, гидравлических, термических, химических и электрических систем

Вид энергии	Эксергетическая переменная усилия, e	Единица измерения	Переменная потока, f	Единица измерения
Механическая (поступательное перемещение)	Сила, F	Н	Скорость, v	м/с
Тепловая: Конвективный поток тепловой энергии Кондуктивный поток тепловой энергии	Удельная эксергия, e' Фактор Карно $\eta_k = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Массовый расход, \dot{m} Тепловой поток, \dot{Q}	кг/с Вт
Химическая	Удельная химическая эксергия, e_x	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$	Мольный расход, \dot{m}_x	Моль/с

В общем случае каждый поток f_i , входящий в уравнение ОЭДФ, является сложной функцией движущей силы e_i , при этом для изотропных систем при малых отклонениях от равновесия, соблюдая принцип Кюри для этой функции, справедливо линейное кинетическое соотношение между потоком и термодинамической силой и ее можно разложить в степенной ряд:

$$f_i = \sum_{t=1}^N L_{it} e_t + \frac{1}{2!} \sum_{t,k=1}^N L_{itk} e_t e_k + \frac{1}{3!} \sum_{t,k,\ell=1}^N L_{itkl} e_t e_k e_\ell + \dots, \quad (4)$$

где L_{it} , L_{itk} , L_{itkl} – феноменологические (кинетические) коэффициенты, характеризующие проводимость по прямым и перекрестным эффектам.

При тех же условиях соотношение между термодинамическим усилием e_i и потоком f_i можно представить в виде линейного кинетического соотношения и также разложить в степенной ряд:

$$e_i = \sum_{t=1}^N R_{it} f_t + \frac{1}{2!} \sum_{t,k=1}^N R_{itk} f_t f_k + + \frac{1}{3!} \sum_{t,k,l=1}^N R_{itkl} f_t f_k f_l + \dots, \quad (5)$$

где R_{it} , R_{itk} , R_{itkl} - феноменологические (кинетические) коэффициенты, характеризующие сопротивление по прямым и перекрестным эффектам.

Несмотря на то, что в работах А.А.Медведева, П.Г.Романкова [17] был уточнен физический смысл феноменологических коэффициентов, вопрос их количественного определения представляет самостоятельную задачу, требующую решения. В задачах энергосбережения особо важно определить аналитические зависимости для этих коэффициентов, что даст возможность влиять на снижение потерь эксергии в анализируемых системах. Обычно вклад перекрестных эффектов в общую скорость процесса на порядок ниже по сравнению с прямыми эффектами [18].

Запишем уравнение производства потерь эксергии (1) в виде компактного выражения

$$\in (f, e) = \sum_{i=1}^N f_i e_i \geq 0, \quad (6)$$

где N - количество независимых скалярных потоков f_i и сил e_i . Поскольку производство потерь эксергии можно всегда представить в виде суммы произведений соответствующего числа потоков и сопряженных с ним сил, соотношение (6) справедливо в самом общем случае независимо от того даны или нет линейные соотношения, связывающие потоки и силы.

В случае конститутивных линейных уравнений

$$f_i = \sum_{k=1}^i L_{ik} e_k \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (7)$$

используя соотношение взаимности Онзагера для коэффициентов

$$L_{ik} = L_{ki} \quad (i, k = 1, 2, \dots, N), \quad (8)$$

величину \in также можно представить в виде однородного квадратичного выражения, содержащего термодинамические силы, т.е.

$$\in = \sum_{i,k=1}^N L_{ik} e_i e_k \geq 0 \quad (9)$$

В отличие от (6) это выражение основано уже на справедливости конститутивных линейных уравнений (7).

Так как производство потерь эксергии положительно определенная величина, то все диагональные элементы симметрической матрицы $L_{ik} + L_{ki}$ положительны, а для недиагональных элементов должно выполняться следующее соотношение:

$$L_{ii}L_{kk} \geq \frac{1}{4}(L_{ik} + L_{ki}).$$

Иногда используются альтернативные формы выражений (7) - (9), в которые вместо коэффициентов проводимости L_{ik} входят коэффициенты сопротивления R_{ik} . Вводя матрицу сопротивлений R_{ik} , обратную матрице L_{ik} , получаем

$$\sum_{m=1}^N L_{im} R_{mk} = \sum_{m=1}^N R_{im} L_{mk} = \delta_{ik} \quad (i, k = 1, 2, \dots, N), \quad (10)$$

где δ_{ik} - символ Кронекера..

Тогда вместо выражений (7) - (9) имеем

$$e_i = \sum_{k=1}^N R_{ik} f_k \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (11)$$

$$R_{ik} = R_{ki} \quad (i, k = 1, 2, \dots, N), \quad (12)$$

$$\epsilon = \sum_{i,k=1}^N R_{ik} f_i f_k \geq 0 \quad (13)$$

Выражения (7) – (9) и их альтернативные формы (11) – (13) эквиваленты друг другу. Этот факт является исходным положением для наших дальнейших рассуждений. Опираясь на справедливость соотношений симметрии (8) и (12), мы можем рассматривать выражения (9) и (13) как неравновесные потенциальные функции. Однако другие неравновесные потенциальные функции могут быть получены непосредственно из так называемых функций рассеяния, впервые введенных Рэлеем [18] и Онзагером [20].

Дьярмати[19], обобщив функцию рассеяния Рэля, ввел два потенциала рассеяния:

$$\psi \equiv \psi(e, e) \equiv \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^N L_{ik} e_i e_k \geq 0 \quad (14)$$

$$\varphi \equiv \varphi(f, f) \equiv \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^N R_{ik} f_i f_k \geq 0 \quad (15)$$

Так как справедливы анализируемые конститутивные линейные уравнения, то делаем заключение о том, что потенциалы равны половине производства потерь эксергии.

Следовательно, ψ и φ , подобно ϵ , являются локальной мерой неравновесности и отличаются друг от друга лишь способом описания неравновесного состояния.

Трансформировав общий принцип Дьярмати, объединяющий принцип наименьшего производства энтропии Пригожина и наименьшего рассеяния энергии Онзагера, введем «обобщенную модифицированную функцию Дьярмати», являющуюся разностью между производством потерь эксергии и суммой обоих потенциалов рассеяния эксергии:

$$\epsilon = \sum_{i=1}^N f_i e_i, \quad TD = \epsilon - (\varphi + \psi)_\vartheta \quad (16)$$

Тогда нетрудно сформировать принцип локального экстремума

$$\epsilon - (\varphi + \psi)_\vartheta = \max \quad (17)$$

и «модифицированный интегральный принцип Дьярмати»:

$$\int [(\psi + \varphi)_\vartheta - \epsilon] dV = \min \quad (18)$$

Остановимся на попытке обобщения «модифицированного интегрального принципа Дьярмати» на нелинейные проблемы. Она может возникнуть, если мы будем рассматривать коэффициенты L_{ik} и R_{ik} как функции $F_j = T, P, \mu, \dots$ (термодинамических сил), сохраняя соотношения взаимности:

$$f_j = \sum_{k=1}^N \bar{L}_{ik} (F_1, F_2, \dots, F_j) \cdot \nabla F_k, \quad (19)$$

$$\nabla F_j = \sum_{k=1}^N \bar{R}_{ik} (F_1, F_2, \dots, F_j) \cdot f_k, \quad (20)$$

$$\bar{L}_{ik} = \bar{L}_{ki}, \quad (21)$$

$$\bar{R}_{ik} = \bar{R}_{ki} \quad (22)$$

Нетрудно показать, что в этом случае интегральный принцип (18) остается в силе. Исследования свойств квазилинейного приближения, при котором L_{ik} , R_{ki} рассматриваются как функции параметров F_j , привело Дьярмати [19] к заключениям фундаментального характера, относящимся к различным формулировкам его общего принципа. При этом предлагаемый полный «модифицированный интегральный принцип Дьярмати» (18) позволяет получить соответствующие уравнения переноса. Это доказывает, что именно он является одним из основных принципов необратимой термодинамики.

В формализме топологоексергетического метода были разработаны:

1. Система переменных, основанная на концепции эксергии.
2. Модели узлов слияния и разделения энергетических потоков, учитывающие эксергетический аспект этих процессов.

3. Элементная база метода, включающая, в том числе, новые элементы диаграмм связи – нуллаторы, нораторы, нуллары.
4. Методика получения системы уравнений, отражающей эксергетические особенности функционирования моделируемого объекта, включающая разработку кодовой диаграммы и построение топологоэксергетической структуры связи.

Топологоэксергетический метод анализа физико-технологических систем апробирован при моделировании пластинчатого рекуператора, разработанного кафедрой промышленной теплоэнергетики Днепродзержинского государственного технического университета, трубы-сушилки и других физико-технологических систем.

Выводы

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили:

1. Сформулировать цели и стратегию топологоэксергетического метода моделирования физико-технологических систем.
2. Сформулировать математический аспект топологоэксергетического метода описания ФТС.
3. Разработать обобщенную эксергодиссипативную функцию как основу топологоэксергетического подхода к анализу ФТС, определяющую все возможные виды энергозатрат на протекание необратимых процессов различной физико-химической природы и обладающей логической стройностью и эвристической силой.
4. Ввести понятие обобщенной модифицированной функции Дьярмати, являющейся разностью между производством потерь эксергии и суммой обоих потенциалов рассеяния.
5. Сформулировать принципы локального экстремума и модифицированный интегральный принцип Дьярмати, являющиеся одними из принципов необратимой термодинамики.
6. Разработать структурные подсистемы формализма топологоэксергетического метода.
7. Получить в аналитической форме картину влияния проектно-конструктивных и технологических факторов на термодинамическую эффективность анализируемых ФТС с помощью предлагаемого топологоэксергетического подхода.
8. Разработать критерии оценки энергетической эффективности физико-технологических систем на основе топологоэксергетического подхода.

Литература

1. Шаргут Я., Петела Р. Эксергия.-М.: Энергия, 1968.-277с.
2. Эксергетические расчеты технических систем: Справочное пособие. Бродянский В.М., Верхивкер Г.П., Карчев Я.Я. и др.: Под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. АН УССР ИТТФ - Киев: Наукова думка. 1991.-360с.
3. Степанов В.С. Анализ энергетического совершенства технологических процессов Новосибирск.: Наука, 1984.-273с.
4. Долинский А.А. , Басок Б.И., Гулый И.С., Накорчинский А.И., Шурчкова Ю.А. Дискретно-импульсный ввод энергии в теплотехнологиях. Киев.: ИТТФ НАНУ, 1996. - 206 с.
5. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии.- М.: Наука, 1976.-500с

6. Rosenberg R.C., Karnopp D.C. Introduction to Physical System Dynamics. McGraw-Hill. New York. 1983.- pp. 429
7. Долгополов И.С. Топологический метод моделирования гидродинамики аппарата вихревого псевдооживленного слоя // Математичне моделювання.-2001.-№ 2(7).-С. 40-44
8. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Тучин С.В. Расчет насосного эффекта в аппарате взвешенного слоя с измельчителем на основе топологического принципа описания физико-химических систем. -Металлургическая теплотехника.- Сборник научных трудов ДМетАУ.- Днепропетровск.: Национальная Metallургическая Академия Украины, 2000 , т.3, с.34-39
9. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Тучин С.В. Топологический подход к определению эффективности совмещенных процессов химической реакции и диффузии.- Metallургическая теплотехника.- Сборник научных трудов ДметАУ.- Днепропетровск: Национальная Metallургическая Академия Украины, 2001 , т.4, с.20-26
10. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Решетов Р.В. Метод диаграмм связи в моделировании гидродинамики аппарата вихревого псевдооживленного слоя (динамика и статика). Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць.-Випуск 3(20), 2002.-Дніпропетровськ , с. 118-122.
11. Долгополов И.С. Тучин В.Т., Шрамко О.А. Новые узлы разделения в тополого-эксергетическом методе моделирования физико-технологических систем (ФТС). // Математичне моделювання.-2003.-№ 1(9).-С. 50-56
12. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Обобщенная эксергодиссипативная функция как основа топологоэксергетического подхода анализа физико-технологических систем. - Metallургическая теплотехника.- Сборник научных трудов ДметАУ.- Днепропетровск.: Национальная Metallургическая Академия Украины, 2000 , т.5, с.67-71
13. Долгополов И.С. Модели узлов смешения и разделения потоков в топологоэксергетическом анализе физико-технологических систем.// Математичне моделювання.-2002.-№ 1(8).-С. 49-52
14. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем. // Промышленная теплотехника.- 2003, т.25 № 4, с.116-118
15. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Тучина У.Н. Разработка топологоэксергетического метода анализа энергосбережения физико-технологических систем // Збірник тез доповідей 4-й Всеукраїнської науково-методичної конференції “Екологія та інженерія. Стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій”, Днепро-дзержинск-2002, с.235-236.
16. Долгополов И.С., Никулин А.В., Тучин В.Т. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС // III Всеукраинская научная конференция «Математические проблемы технической механики» (материалы конференции). Днепро-дзержинск, 2003, с.49.
17. Медведев А.А., Романков П.Г., ЖПХ, 1959, XXXII. с.1021
18. Де Гроот С, Мазур П. Неравновесная термодинамика.- М.: Мир. 1964. 456с.
19. Gyarmati I., Acta Chim. Hung., 30, 147, 1962.
20. Onsager L. Phys. Rev., 37, 405 (1931); 38, 2265 (1931).