

ТОПОЛОГОЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД КАК ЕДИНАЯ БАЗА ДАННЫХ ПРИ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ КАНОНИЧЕСКИХ АНСАМБЛЕЙ ФИЗИКО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Часть 1

Введение

Физико-технологические системы (ФТС), рассматриваемые с позиций энергосбережения [1-11], представляются технологическими процессами, реализуемыми с помощью разнообразных аппаратов, агрегатов, устройств и машин, обрабатывающих исходное сырье и реагенты с целью получения конечного продукта и поставки его потребителю при минимальных энергозатратах. Применяющиеся для этого аппараты, агрегаты и машины классифицируются как система канонического ансамбля (КА), включающего в себя три основных элемента: привод, рабочий орган, обрабатываемую среду. До настоящего времени изучение канонических ансамблей осуществлялось, как правило, с использованием теорий (подходов), в которых строение и состав исследуемых элементов ансамблей не рассматривались с учетом энергосберегающих аспектов при расчетах и анализе эффективности их применения. Можно констатировать устойчиво низкую эффективность канонических ансамблей, проектируемых в настоящее время [20-24], в металлургической, химической и нефтяной промышленности.

Постановка задачи

Предлагаемый в данной работе тополого-эксергетический подход позволяет формализовать эксергетический аспект анализируемого КА путем представления его топологоэксергетической структуры связи в виде математического описания. Такой подход позволяет проектировать и создавать достаточно надежное энергоэкономичное оборудование, обладающее высокой эффективностью при его применении в производственных процессах. Предлагается методология, позволяющая улучшить проектирование инженерных систем.

Методика решения

Возрастающая сложность проектирования элементов и устройств КА ФТС ведет к усложнению их математических моделей, а объединение таких моделей в целенаправленные системы приводит к усложнению организации всего процесса проектирования. Характерной особенностью всей проблемы проектирования КА ФТС, рассматриваемой в этой работе, является представление структурной и параметрической информации о статических и динамических эксергетических характеристиках широкого класса устройств, систем и управление этой информацией. В частности, основные эксергетические статические и динамические характеристики будут определены таким образом, чтобы их можно было:

- 1) эффективно и гибко описать и запомнить;
- 2) найти и преобразовать для конкретных целей проектирования;
- 3) удобно объединить в структуры (конфигурации) систем.

Нами разработана [1-11] с позиций системного подхода стратегия тополого-эксергетического метода анализа энергосбережения ФТС, позволяющая отразить связь конструктивно-технологических характеристик объекта с затратами эксергии на реализацию процессов в стационарных и нестационарных условиях их протекания. Системный подход в рамках применения топологоэксергетического метода анализа и синтеза энергосберегающих технологий и оборудования предполагает:

- 1) формирование цели исследования, постановку задачи по реализации этой цели и определение критерия эффективности решения задачи;
- 2) четкое задание ограничений для достижения заданной цели;

- 3) проведение качественного анализа энергетической структуры ФТС;
- 4) синтез функционального оператора физико-технологических систем на основе топологоэнергетического метода описания ФТС;
- 5) идентификацию и проверку адекватности операторов ФТС.

При создании единой базы данных для обеспечения системотехнического проектирования КА ФТС необходимо рассмотреть несколько важных факторов, таких, как эффективность описания модели, простота внесения изменений в модель и средства, позволяющие объединить модели отдельных устройств в системы. В качестве единой базы данных может быть использована многосвязная модель и соответствующая ей топологоэнергетическая структура связи, особенно если устройство и система работают одновременно в нескольких энергетических областях (например, электромеханические или гидромеханические преобразования). Топологоэнергетические структуры связи позволяют создать компактную и гибкую базу данных КА ФТС для линейных и нелинейных, статических и динамических моделей. Кроме того, топологоэнергетические структуры могут быть использованы при анализе причинных связей - важной информации о различных отношениях вход-выход, а также об особенностях соединений между элементами при объединении подсистем в систему. В частности, для нелинейных КА ФТС большой размерности это является важной особенностью процесса формулирования уравнений состояния.

Прежде чем подробно описать топологоэнергетический подход к проектированию КА ФТС, обратимся к некоторым критериям эффективности, позволяющим усовершенствовать методы проектирования инженерных систем.

Критерии эффективности

Поскольку в процессе проектирования КА ФТС изменяются, изменяются и представляющие их данные. Гибкость средств интеграции этих данных должна позволять, наряду со стабильным базисом, представлять аспекты эволюции. Такая гибкость достигается двумя способами. Во-первых, обеспечиваются разносторонние взгляды на одни и те же данные. Например, различные приложения могут накладывать на данные свои ограничения и конкретную интерпретацию.

Вместе с тем та часть представления данных, которая осуществляется системой ввода данных, должна оставаться достаточно абстрактной для того, чтобы обеспечить множественность взглядов. С другой стороны, должна существовать возможность единообразного представления различных данных.

При этом основные отличительные признаки КА ФТС как сложных систем следующие:

- 1) наличие большого количества связанных и взаимодействующих элементов;
- 2) свойственность в той или другой степени признаков (черт) самоорганизации;
- 3) сложность функций, выполняемых системой и направленных на достижение заданной цели;
- 4) наличие управления (часто имеющего иерархическую структуру) разветвленной информационной сетью и интенсивных потоков информации;
- 5) возможность разбиения системы на подсистемы, задачи которых подчинены общей цели функционирования всей системы;
- 6) наличие взаимодействия с внешней средой.

Реализуя топологоэнергетический подход как единую базу при системотехническом проектировании КА ФТС и соответствующие методы оперирования с ними для обеспечения проектирования энергосберегающих инженерных систем в различных энергетических областях (например, механической, тепловой, гидравлической, электрической, химической), сформулируем ряд критериев эффективности:

- 1) полнота и простота описания основных типовых элементов КА, даже если они включают несколько видов преобразования энергии и сигналов;
- 2) эффективность модификации описания тепловых устройств с целью включения или исключения различных эффектов;
- 3) эффективность получения дополнительной информации только в случае необходимости;
- 4) эффективность объединения моделей устройств КА в корректное описание на системном уровне.

Любая формально заданная мера эффективности методики проектирования КА ФТС прежде чем стать общепринятой, должна пройти широкую проверку на задачах разного типа. Предварительные же суждения о воз-

можной эффективности предлагаемой методики можно вынести на основе умозрительного рассмотрения. Так как подход, описываемый в настоящей статье, не нашел еще широкого инженерного применения, то представляется целесообразным предположить некоторые свойства предлагаемой методики, являющиеся перспективными при формулировке эффективных правил проектирования КА ФТС.

Формализация канонических ансамблей как сложных ФТС

Рассмотрим в общем случае КА ФТС как сложную динамическую реальность, характеризуемую отображением $z(t)$ множества T в множество Z , где Z - множество состояний системы z , а $z(t)$ - состояние системы в момент времени t . Совокупность точек $z_t \in Z$, соответствующих в силу данного состояния $z(t)$ всем $t \in T$, называется траекторией этой динамической реальности. Таким образом, под динамической реальностью КА ФТС понимается объект, находящийся в каждый момент времени t (из множества T) в одном из возможных состояний z_t (из множества Z) и способный переходить (во времени) из одного состояния в другое под действием внешних и внутренних причин, совершая при этом движение $z(t)$.

Чтобы учесть внешние причины, необходимо рассмотреть взаимодействие динамического КА ФТС с внешней средой. Оно осуществляется посредством воздействия внешней среды на динамический КА ФТС и динамического КА ФТС на внешнюю среду. Такого рода воздействия принято называть сигналами, а процесс взаимодействия динамического КА ФТС с внешней средой рассматривать в рамках механизма обмена сигналами. Каждому такому входному сигналу отвечает пара сопряженных переменных: переменная типа «обобщенное эксергетическое усилие» e_i и переменная типа «обобщенный поток» f_i . Выбор, по крайней мере, одного множества $X = (e_1, \dots, e_n; f_1, \dots, f_n)$ из p этих величин достаточен для определения сопряженного множества $Y = (f_1, \dots, f_n; e_1, \dots, e_n)$. Отображение $X \rightarrow Y$ называется определяющим соотношением n -связного элемента.

Основная проблема при исследовании КА ФТС методом топологоэксергетических структур связи заключается в построении алгоритма структур связей и последующем представлении n -связных элементов в виде набора элементарных «стандартных» 1-, 2- и 3-связных элементов (т. е. R, L, C, 0, 1, TD). Подробнее об этом сказано в [6-19]. Прежде

чем обсуждать вопрос о соединениях систем из n -связных элементов, необходимо наложить следующие ограничения на переменные (e_i, f_i) в узлах связей. Во-первых, допускается соединение только сигналов (связей) одинаковой энергетической природы (механических с механическими, тепловых с тепловыми и т.д.). Во-вторых, на переменные типа поток f_i накладываются ограничения в виде линейного уравнения сохранения и его закон Кирхгофа для потоков (ЗКП). В-третьих, на переменные типа эксергетическое усилие e_i накладываются ограничения в виде линейного уравнения непрерывности и его закон Кирхгофа для эксергетических усилий (ЗКУ). Целесообразно выбрать переменные e_i, f_i таким образом, чтобы их произведение имело размерность мощности. Тогда входной сигнал x_t , поступающий из внешней среды в динамическую систему в момент t , характеризуется координатами $e_{вх1}, e_{вх2}, \dots, e_{вхm}; f_{вх1}, f_{вх2}, \dots, f_{вхm}$ и является элементом множества X входных сигналов. Аналогично выходной сигнал y_t , поступающий из системы во внешнюю среду в момент t , описывается координатами $e_{вых1}, e_{вых2}, \dots, e_{выхm}; f_{вых1}, f_{вых2}, \dots, f_{выхm}$ и является элементом множества Y выходных сигналов динамики КА ФТС. При этом КА ФТС как динамическая реальность в широком смысле рассматривается в виде математического объекта, содержащего в своем описании следующие механизмы:

- 1) механизм изменения состояний под действием внутренних причин (без вмешательства внешней среды);
- 2) механизм приема входного сигнала и изменения состояний под воздействием этого сигнала;
- 3) механизм формирования выходного сигнала как реакции динамической системы на внутренние и внешние причины изменения состояния.

Обычно эти механизмы описываются так называемыми операторами переходов H (в новое состояние) и выходов G , реализующими отображения

$$H: T \times Z \times X \rightarrow Z \quad (1)$$

$$G: T \times Z \times X \rightarrow Y \quad (2)$$

Однако такое задание динамического КА ФТС оказывается общим и недостаточно определенным (пока на рассматриваемые множества и операторы не накладываются никакие ограничения). Имея в виду цели машинного моделирования сложных систем,

можно обойтись частным случаем описания упомянутых механизмов. Под взаимодействием элементов КА ФТС как сложной системы мы понимаем режим совместного функционирования элементов, при котором поведение или свойство одного элемента в общем случае зависит от условий, определенных поведением или свойствами других элементов. Взаимодействие представляется как результат влияний, оказываемых элементами сложной системы друг на друга.

Рассмотрим систему S , состоящую из элементов $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \dots, \mathcal{E}_N$. Влияние элемента \mathcal{E}_1 системы S на элемент \mathcal{E}_k той же системы определяется сигналами, поступающими от элемента \mathcal{E}_1 к элементу \mathcal{E}_k . Выходной сигнал \mathcal{E}_1 , сформированный с учетом условий функционирования этого элемента, трансформируется при передаче его по реальному каналу связи и поступает к элементу \mathcal{E}_k в качестве входного сигнала, вызывающего изменение в поведении этого элемента.

При топологоэнергетической формализации взаимодействия элементов КА ФТС как сложной системы обычно придерживаются предположения, согласно которому взаимодействие достаточно полно и точно описывается в рамках механизма обмена сигналами. Поэтому для формального описания взаимодействия элементов \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_k сложной системы достаточно иметь следующие четыре модели:

- 1) формирования выходного сигнала элемента \mathcal{E}_1 ;
- 2) сопряжения элементов сетью каналов связи, обеспечивающих передачу сигналов между ними;
- 3) трансформации сигнала в процессе прохождения через реальный канал связи;
- 4) приема входного сигнала и поведения элемента \mathcal{E}_k под воздействием этого сигнала.

Первая и четвертая из перечисленных здесь моделей известны по материалам предыдущих публикаций [9, 14]. Первая модель описывается соотношением для выходного сигнала в зависимости от момента выдачи и состояния в этот момент. Четвертая модель описывается скачком состояния при поступлении входного сигнала. Отсюда следует, что при построении математических моделей элементов КА ФТС в виде динамических систем необходимо, чтобы их определяющие соотношения строились с учетом их взаимодействия.

Целесообразно подчеркнуть, что аналогичный подход остается правомочным и для случая взаимодействия системы с объектами внешней среды. Объект внешней среды, выдающий сигналы одному или нескольким элементам системы, должен быть описан, по крайней мере, моделью формирования выходного сигнала. Объект внешней среды, принимающий сигналы от элементов систем (если его поведение учитывается при исследовании системы), должен быть описан, по крайней мере, моделью приема входного сигнала и поведения под воздействием этого сигнала. При этих предположениях изучение оставшихся двух моделей - трансформации и сопряжения - можно вести совместно для системы и внешней среды.

Для того, чтобы модель трансформации сигнала в процессе его передачи по каналу связи с достаточной точностью отражала реальные условия прохождения сигнала через канал, обычно реальные каналы связи рассматриваются как самостоятельные элементы сложной системы или формализованные каналы. Эти элементы описывают динамические системы с соответствующими характеристиками, моделирующими процесс трансформации. Тогда процесс трансформации превращается в процесс функционирования динамической системы, на вход которой поступает выходной сигнал элемента \mathcal{E}_1 , а с выхода выдается входной сигнал элемента \mathcal{E}_k . Очевидно, что относительно идеальных каналов, связывающих элемент \mathcal{E}_1 с формализованным каналом как самостоятельным элементом системы и формализованный канал с элементом \mathcal{E}_k , в этом случае справедливо предположение: сигналы передаются по идеальным каналам связи мгновенно и без искажений. Это обязательство приводит к особой простоте и наглядности рассматриваемой формализованной схемы взаимодействия элементов КА ФТС. При этом всегда считаем, что сведения о динамике функционирования любого канала связи нам заданы; задача состоит в превращении их в соответствующие характеристики динамической системы, моделирующей данный канал.

Остается последняя модель КА ФТС - модель сопряжения элементов сложной системы сетью идеальных каналов связи, обеспечивающих передачу сигналов между элементами. Эта модель отражает структурный аспект взаимодействия элементов КА ФТС в процессе ее функционирования. С практичес-

математической модели оказывается неидентичность кодирования входных и выходных сигналов. Такого рода причины легко устраняются. Достаточно ввести единую систему кодирования элементарных сигналов и соответствующих им контактов (соединений).

В некоторых случаях указанная неидентичность не может быть устранена средствами единого кодирования. Тогда реально существующие устройства сопряжения должны рассматриваться как самостоятельные элементы сложного КА ФТС.

Как показывает опыт [15-17], в процессе топологоэнергетической формализации почти всегда удается свести реальный КА ФТС к топологоэнергетической структуре, адекватной предлагаемой модели. Поэтому рассматриваемые здесь предположения применяются на практике.

Для построения математической модели сопряжения элементов сложного КА ФТС необходимо также иметь в виду и взаимодействие ее с внешней средой. Это взаимодействие рассматривается как процесс обмена сигналами между объектами внешней среды и элементами системы. Другими словами, каждый сигнал, выдаваемый КА ФТС во внешнюю среду, складывается из элементарных сигналов, выдаваемых одним или несколькими элементами системы; сигналы, составляющие сигнал, поступающий из внешней среды, принимаются одним или несколькими элементами системы. Поэтому объекты внешней среды можно представить в виде элементов, аналогичных элементам системы.

Рассмотрим сначала случай единственного объекта внешней среды \mathcal{E}_0 , вход которого содержит n_0 входных соединений (контактов) $X_i^{(0)}$, а выход r_0 выходных соединений (контактов) $Y_i^{(0)}$, $i = 1, 2, \dots, n_0$; $i = 1, 2, \dots, r_0$.

Сигнал, выдаваемый системой во внешнюю среду, принимается элементом \mathcal{E}_0 как входной сигнал, содержащий сигналы $(e_1^{(0)}, e_2^{(0)}, \dots, e_{n_0}^{(0)}; f_1^{(0)}, f_2^{(0)}, \dots, f_{r_0}^{(0)})$. Сигнал, поступающий в систему из внешней среды, является выходным сигналом элемента \mathcal{E}_0 , содержащим сигналы

$$(e_1^{(0y)}, e_2^{(0y)}, \dots, e_{n_0}^{(0y)}; f_1^{(0y)}, f_2^{(0y)}, \dots, f_{r_0}^{(0y)}).$$

Сигнал $y_i^{(0)}$ выдается выходным соединением (контактом) $Y_i^{(0)}$, а сигнал $X_i^{(0)}$ принимается входным контактом $X_i^{(0)}$. В рамках принятых предположений о механизме обмена сигналами

математическая модель любого элемента системы \mathcal{E}_i (так же, как и \mathcal{E}_0) описывается парой множеств: $[X_i^{(j)}]_N$ и $[Y_i^{(j)}]_N$ где $j=0, 1, \dots, N$. Рассмотрим множество всех входных соединений всех элементов системы и внешней среды

$$[X_i^{(j)}]_N = \bigcup_{j=0}^N [X_i^{(j)}]_N \quad (5)$$

и множество всех выходных соединений всех элементов системы и внешней среды

$$[Y_i^{(j)}]_N = \bigcup_{j=0}^N [Y_i^{(j)}]_N \quad (6)$$

Пусть теперь внешняя среда имеет более сложное строение, а именно, будем рассматривать конечное число внешних источников сигналов $\hat{\mathcal{E}}_{01}, \hat{\mathcal{E}}_{02}, \dots, \hat{\mathcal{E}}_{0k^*}$, характеризуемых множествами выходных соединений

$[Y_i^{(0k)}]_N$, где $k=1, 2, \dots, k^*$, и конечное число внешних потребителей сигналов $\tilde{\mathcal{E}}_{01}, \tilde{\mathcal{E}}_{02}, \dots, \tilde{\mathcal{E}}_{0j^*}$, описываемых множествами

входных соединений $[X_i^{(0j)}]_N$, $j = 1, 2, \dots, j^*$.

В этом случае множество всех входных соединений всех элементов системы и внешней среды можно записать в виде

$$[X_i^{(j)}]_N = \left\{ \bigcup_{j=1}^N [X_i^{(j)}]_N \right\} \cup \left\{ \bigcup_{j=1}^{j^*} [X_i^{(0j)}]_N \right\} \quad (7)$$

а множество всех выходных соединений всех элементов системы и внешней среды как

$$[Y_i^{(j)}]_N = \left\{ \bigcup_{j=1}^N [Y_i^{(j)}]_N \right\} \cup \left\{ \bigcup_{k=1}^{k^*} [Y_i^{(0k)}]_N \right\} \quad (8)$$

Располагая множествами $[X_i^{(j)}]_N$ и $[Y_i^{(j)}]_N$, которые нетрудно получить для случая любой конфигурации и состояния внешней среды, можно ввести однозначный оператор:

$$Y_i^{(k)} = R(X_i^{(j)}), \quad (9)$$

реализующий отображение $[X_i^{(j)}]_N \rightarrow [Y_i^{(j)}]_N$

и сопоставляющий входному соединению $X_i^{(j)} \in [X_i^{(j)}]_N$ выходное соединение

$Y_i^{(k)} \in [Y_i^{(j)}]$, связанное с ним элементарным каналом. Если в рассматриваемой системе к данному входному соединению $X_i^{(j)}$ не подключен никакой элементарный канал, оператор R в выражении (9) не определен на этом $X_i^{(j)}$.

Кодовая схема сопряжения (в канонической форме) элементов КА ФТС представлена в качестве примера сложной одноуровневой системы (рис.1), состоящей из элементов $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3, \mathcal{E}_4$ и \mathcal{E}_5 с источниками внешней среды $\mathcal{E}_{01}, \mathcal{E}_{02}, \dots, \mathcal{E}_{03}$ и потребителя \mathcal{E}_{01} . Рассмотрим оператор R для этого примера. Совокупность множеств

$[X_i^{(j)}]_i^n \rightarrow [Y_i^{(j)}]_i^r$ для всех элементов системы

S и внешней среды вместе с оператором R будем называть схемой сопряжения (в канонической форме) элементов в системе S , а оператор R - оператором сопряжения.

$[X_i^{(j)}]_i^n$ и $[Y_i^{(j)}]_i^r$ для всех элементов

системы S и внешней среды вместе с оператором R будем называть схемой сопряжения (в канонической форме) элементов в системе S , а оператор R - оператором сопряжения.

Оператор сопряжения обычно задается в виде таблицы, в которой на пересечении столбцов с номерами элементов системы (j) и строк с номерами входных контактов (i) располагаются пары чисел (k, l), указывающие номер элемента (k) и номер выходного

соединения (l), с которым соединен контакт $X_i^{(j)}$.

Оператор R может быть представлен таблицей другого типа. Каждому входному соединению ставим в соответствие столбец с номером, состоящим из пары чисел (j, l), а каждому выходному соединению - строку с номером (k, l). На пересечении помещается единица, если от выходного соединения $Y_i^{(k)}$ имеется элементарный канал к входному соединению $X_i^{(j)}$. Хотя таблица такого рода громоздка и менее наглядна, она обладает тем преимуществом, что представляет собой матрицу смежности топологоэксергетической структуры связи. Это позволяет применить методы топологоэксергетической формализации для изучения структуры связей между входными и выходными соединениями элементов ФТС и внешней среды. Одноуровневая схема сопряжения в канонической форме является основным средством задания структуры связей между элементами сложной ФТС в том случае, когда сама система оказывается одноуровневой: ее элементы входят непосредственно в систему и не распределены по подсистемам. Она может служить эквивалентной схемой сопряжения для сложной системы, описанной схемой сопряжения с любым числом уровней. Кроме того, одноуровневая схема сопряжения может быть принята в качестве стандартного вида схемы сопряжения при построении имитационных алгоритмов.

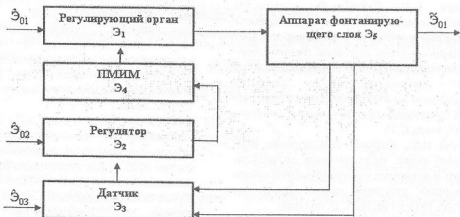


Рис.1. Одноуровневая кодовая схема сопряжения элементов сложной системы автоматического регулирования расхода ожигающего агента в аппарате фонтанирующего слоя

Выводы

1. Сформулирован теоретико-множественный подход реализации топологоэксергетического принципа моделирования при системотехническом проектировании КА ФТС.
2. Предложены критерии эффективности, позволяющие совершенствовать методики проектирования инженерных систем, содержащие канонические ансамбли ФТС.
3. Выполнена формализация канонических ансамблей как сложных ФТС.
4. Разработана теоретико-множественная модель сопряжения элементов КА ФТС.

Литература

1. Тучин В.Т., Дорохов И.Н., Горбачевич Л.Л. и др. Системный подход к моделированию массообменных процессов разложения карбоната свинца в аппарате фонтанирующего слоя// Материалы второй Всесоюзной научной конференции «Современные машины и аппараты химических производств», Т.1, Чимкент, 1980, С.149-152.
2. Дорохов И.Н., Горбачевич Л.Л., Тучин В.Т. Метод автоматизированного учета геометрической информации при топологическом моделировании физико-химических систем. Деп. в ВИНТИ. №1274-78(78). «Депо.рук.» 1978, -24 с. б/о №540.
3. Тучин В.Т.,Дорохов И.Н. Метод автоматизированного вывода передаточных функций и частотных характеристик физико-химических систем на основе диаграмм связи. Деп. в ВИНТИ. №3296-78(79). «Депо.рук.» 1979, №2 - 25 с. , б/о №219.
4. Тучин В.Т. Системный подход к моделированию газодинамики верхней зоны доменной печи с помощью топологического метода описания физико-химических систем// Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара «Проблемы автоматизированного управления доменным производством», октябрь, 1983, Киев, С.15.
5. Тучин В.Т., Кафаров В.В.,Дорохов И.Н. Новый метод моделирования гидродинамики в аппаратах фонтанирующего слоя с помощью диаграмм связи// Докл. АН СССР, 1979,т.244, №23. С. 664-668
6. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем// Промышленная теплотехника. 2003, т.25, №24, С.116-118.

7. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Обобщенная эксергодиссипативная функция как основа топологоэксергетического анализа физико-технологических систем. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Днепропетровск: НМетАУ, т.5, 2002, С.67-71.
8. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Тучин С.В. Топологический подход к определению эффективности совмещенных процессов химической реакции и диффузии. Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. - Днепропетровск: НМетАУ, 2001, т.4, С.20-26.
9. Братута Э.Г., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический подход к оценке энергозатрат в физико-технологических системах// Интегрированные технологии та енергозбереження.-2003, 4.-С. 20-27.
10. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Тучина У.Н. Разработка топологоэксергетического метода анализа энергосбережения физико-технологических систем // Збірник тез доповідей 4-ї Всеукраїнської науково-методичної конференції “Екологія та інженерія. Стан, наслідки, шляхи створення екологічно чистих технологій”, Дніпродзержинськ, 2002, С.235-236.
11. Долгополов И.С., Никулин А.В., Тучин В.Т. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС // III Всеукраїнська наука конференція «Математические проблемы технической механики» (материалы конференции). Днепропетровск, 2003. С. 49.
12. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Шрамко О.А. Новые узлы разделения в тополого-эксергетическом методе моделирования физико-технологических систем (ФТС) // Математическое моделирование.-2003.-№ 1(9).-С. 56-60.
13. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Система переменных в топологоэксергетическом методе описания физико-технологических систем (ФТС)// Математическое моделирование.-2003.-№ 2 (10).-С. 73-78.
14. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братута Э.Г., Тучина У.Н. Энергетические аспекты топологоэксергетического метода анализа физико-технологических систем (ФТС) -

- Часть 1 // Интегрированные технологии та енергозбереження.-2004.-№4.- С.81-89.
15. Минаева А.С., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Использование тополого-эксергетического метода для разработки экологически безопасных физико-технологических систем. // Вестник ХПИ, 2004, № 38. - С.53-58.
 16. Минаева А.С., Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топоологэксергетический анализ сушильной камеры трубы-сушилки (стационарный режим) // Математичне моделювання.- 2004, №2 (12). - С.55-61.
 17. Долгополов И.С., Тучин В.Т., Словиковский П.А., Хандрига Г.С. Топоолог-ексергетический анализ рекуперативного пластинчатого тепло обменника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины - Днепрпетровск: «Пороги», том 10, 2004.- С.183-194.
 18. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Садовой А.В., Шрамко О.А., Тучина У.Н. Разработка новых элементов метода диаграмм связи для моделирования физико-технологических систем // Энергетика: економіка, технології, екологія.-2004, №1.- С.37-41.
 19. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Элементарная база топологэксергетического метода анализа физико-технологических систем (ФТС) // Математичне моделювання - 2005. -№1(13). С. 1-8.
 20. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии.- М.: Наука, 1976.- 500с.
 21. Кафаров В.В., Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Топоологический принцип формализации.- М.: Наука, 1979.- 394с.
 22. Karnopp D., Rosenberg R. System Dynamics: A Unified Approach. N.Y., John Wiley Inc., 1974. 402 p.
 23. Кичигин А.Ф., Егер Д.А.. Канонические ансамбли в процессах интенсификации добычи нефти. - Київ.:Техніка, 2002.-182 с.
 24. Тучин В.Т., Дорохов И.Н., Кафаров В.В., Горбацевич Л.Л. Синтез математического описания элементов систем автоматизированного управления методом диаграмм связи// Известия АН Армянской ССР, серия технических наук. - 1978.-т.XXXI, №6.-С.47-54.
 25. Тучин В.Т., Долгополов И.С., Садовой О.В., Тучина У.М. Нулатор, норатор і нулорнові елементи діаграм зв'язку// Електроінформ.- 2003.-№3.- С.16-19.