

5. Гоцуленко В.В. Бифуркации динамических режимов в гидросистеме, включающей центробежный насос / В.В.Гоцуленко, В.Н.Гоцуленко // Математическое моделирование. – 2012. – № 1 (26). – С.35-38.
6. Гоцуленко В.Н. Экспериментальное исследование автоколебаний в системе, включающей лопастной насос с монотонно убывающей напорной характеристикой / В.Н.Гоцуленко, Н.Н.Гоцуленко // Энергомашиностроение. – 1978. – № 5. – С.44-45.
7. Гоцуленко В.В. Математическая модель трубы Рийке и условия ее звучания / В.В.Гоцуленко // Математическое моделирование. – 2000. – № 5. – С.39-41.
8. Гоцуленко В.В. Математическое моделирование особенностей феномена Рийке при изменении мощности теплового потока / В.В.Гоцуленко // Математическое моделирование, РАН. – 2004. – Т. 16, № 9. – С.23-28.
9. Гоцуленко В.В. Тепловое сопротивление как механизм возбуждения автоколебаний / В.В.Гоцуленко, В.Н.Гоцуленко // Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки). – Днепродзержинск: ДГТУ. – 2009. – Вып. 1(11). – С.95-100.
10. Беляев Н.М. Термоакустические колебания газожидкостных потоков в сложных трубопроводах энергетических установок / Беляев Н.М., Белик Н.П., Польшин А.В. – К.: Высшая школа, 1985. – 160с.
11. Раушенбах Б.В. Вибрационное горение / Раушенбах Б.В. – М.: Физматгиз, 1961. – 500с.
12. Доменные воздушнонагреватели [Шкляр Ф.Р., Малкин В.М., Каштанова С.П. и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 176с.
13. Гоцуленко В.В. Автоколебания (помпаж) одноступенчатого центробежного насоса в режиме кавитации и их демпфирование / В.В.Гоцуленко, В.Н.Гоцуленко // Инженерно-физический журнал. – 2013. – Т. 86, № 4. – С.857-863.
14. Гоцуленко В.В. Вибрационное горение и термоакустические автоколебания / Гоцуленко В.В. – Изд-во LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 152с.

Поступила в редколлегию 11.12.2013.

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 “ДІА”, г. Днепродзержинск

СТРАТЕГИЯ И ТАКТИКА СИСТЕМНОГО ПОДХОДА К ПРОБЛЕМЕ ЭНЕРГОРЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЯ (ЧАСТЬ 2)

Введение. В первой части работы сформулированы основные задачи работы, дано определение объекта исследований – ФТС в форме, позволяющей реализовать стратегические принципы системного анализа энергоресурсосбережения ФТС.

Рассмотрено содержание первых трех этапов стратегии системного подхода к анализу физико-технологических систем.

Постановка задачи. Во второй части работы решаются задачи 4-7 этапов стратегии системного анализа энергоресурсосбережения ФТС: 4) синтез функционального оператора ФТС на основе топологоэксергетического принципа описания физико-технологических систем; 5) проверка адекватности и идентификация операторов рас-

смаатриваемой ФТС; 6) эксергоэкономическая оптимизация и синтез структуры ФТС; определение устойчивости динамической ФТС; 7) выбор термодинамических принципов управления энергоресурсосбережением ФТС.

Результаты работы. Методика исследований.

4. Синтез функционального оператора ФТС на основе топологоэксергетического принципа описания физико-технологических систем [1, 2].

Для описания реальных физико-химических превращений в ФТС применяют понятие технологического оператора T , который формализует отображение пространства переменных входа в пространство выхода

$$Y = T(u), \quad (1)$$

где u , Y – векторы входных и выходных переменных ФТС.

Так как реальные процессы в ФТС взаимосвязаны, то оператор T характеризуется сложной структурой, которая в свою очередь обусловлена суперпозицией ряда «элементарных» технологических операторов: диффузионного, конвективного и турбулентного переноса вещества и тепла; химического и фазового превращения и т.п.

Реальному отображению (1) соответствует математическая модель в форме функционального оператора Φ , представляющего функциональное пространство входных переменных u и пространство переменных состояния самой ФТС x в пространство оценок выходных переменных $\hat{y}$

$$\hat{y} = \Phi(u, x), \quad (2)$$

где x – вектор переменных состояния ФТС, $\hat{y}$ – вектор выходных состояний ФТС, определяемый по модели.

В явной форме оператор, осуществляющий отображение (2), представляет замкнутую систему дифференциальных, интегральных, интегро-дифференциальных уравнений и соотношений эмпирического характера, дополненную необходимыми начальными и граничными условиями. В дальнейшем под синтезом функционального оператора ФТС будет пониматься построение упомянутой системы уравнений совместно с дополнительными условиями. Для анализа функционирования ФТС недостаточно получить в виде указанной системы уравнений развернутую форму функциональных операторов всех физико-химических систем, входящих в физико-технологическую систему.

Предварительно необходимо выполнить идентификацию этих операторов (т.е. определить их параметры путем решения обратных задач), а затем свести математические описания в явной форме связи между u и $\hat{y}$ – переменными в виде конечных соотношений, т.е. к так называемым модулям. Модулем ФТС, характеризующейся функциональным оператором Φ , будем называть уравнение в конечной форме, разрешенное относительно вектора выходных переменных

$$\hat{y} = \Psi 1(u), \quad (3)$$

в котором вектор-функция $\Psi 1$ является результатом точного или приближенного решения системы уравнений, определяющей данный функциональный оператор Φ . В общем случае функция модуля может быть линейной и нелинейной, рациональной и иррациональной, алгебраической и трансцендентной или являться результатом решения исходной системы уравнений. Таким образом, после процедуры идентификации отображение (3) можно считать готовым для изучения свойств ФТС в рабочем диапазоне изменения ее параметров; нахождения оптимальных конструктивных и режимных параметров технологического процесса; синтеза оптимального управления системой и т.п. При этом практика системных исследований [1-3] показывает, что для эффективно-

го решения задач более высоких уровней иерархии (например, анализ и синтез ФТС, оптимизация и управление ФТС, автоматизированное проектирование ФТС и т.п.) предпочтительным является модульный принцип представления информации, поступающей с нижних уровней иерархии ФТС.

Аналогичный подход применяем для отображения энергетических процессов в ФТС. Для описания реальных энергетических (эксергетических) взаимодействий, преобразований в ФТС применяют понятие энергетического (эксергетического) оператора Ω , который формализует отображение пространства энергетических переменных входа в пространство выхода

$$\mathbf{\Xi} = \Omega(\mathbf{Z}), \quad (4)$$

где $\mathbf{\Xi}$ – вектор выходных энергетических (эксергетических) переменных рассматриваемой ФТС; $\mathbf{Z}$ – вектор входных энергетических (эксергетических) переменных, рассматриваемой ФТС; Ω – оператор энергетических (эксергетических) преобразований систем.

Реальному отображению (4) соответствует математическая модель в форме функционального энергетического (эксергетического) оператора $\mathbf{A}$, представляющего функциональное пространство входных энергетических переменных $\mathbf{Z}$ в пространство оценок выходных энергетических переменных $\mathbf{\Xi}$:

$$\hat{\mathbf{\Xi}} = \mathbf{A}(\mathbf{Z}, \mathbf{W}), \quad (5)$$

где $\hat{\mathbf{\Xi}}$ – вектор выходных энергетических (эксергетических) переменных рассматриваемой математической модели ФТС; $\mathbf{A}$ – функциональный оператор энергетических (эксергетических) преобразований в ФТС; $\mathbf{Z}$ – вектор входных энергетических (эксергетических) переменных ФТС; $\mathbf{W}$ – вектор энергетических (эксергетических) переменных состояния ФТС.

Оператор $\mathbf{A}$ представляет собой замкнутую систему алгебраических, дифференциальных, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений и эмпирическую информацию с указанием начальных и граничных условий. Для того, чтобы раскрыть содержание оператора $\mathbf{A}$, необходимо выбрать способ получения этого оператора в аналитическом или численном виде.

Модель (5) является идеализацией отображения (4) и отражает степень наших знаний о процессе. Для эффективного решения задач, связанных с энергосбережением, возникающих на всех уровнях иерархии ФТС, необходимо выполнить идентификацию операторов (Ω , $\mathbf{A}$) отдельных физико-химических систем, составляющих ФТС, т.е. оценить входящие в них параметры. Проведенная идентификация позволяет считать отображение (7) готовым для изучения свойств ФТС с точки зрения энергосбережения. Реализация этой задачи связана с решением системы уравнений, соответствующих отображению (5), что равносильно получению явной функциональной связи между переменными $\mathbf{\Xi}$ и $\mathbf{Z}$ либо в аналитической форме конечных соотношений, либо в виде результата численного решения задачи на ЭВМ. Это решение представляется в виде отображения (модуля)

$$\mathbf{\Xi} = \mathbf{a}(\mathbf{Z}), \quad (6)$$

в котором вектор-функция $\mathbf{a}$ отражает результат аналитического или численного решения вышеупомянутой смешанной системы уравнений, определяющей функциональный оператор энергетических (эксергетических) преобразований $\mathbf{A}$. Опыт системных исследований в моделировании энергетических аспектов ФТС показал, что в таком моделировании целесообразно использовать модульный принцип описания, заключающийся в создании модулей на самых низших ступенях иерархии ФТС.

С математической позиции задача анализа ФТС с точки зрения энергосбережения сводится к решению многомерных нелинейных систем уравнений с использованием различных численных методов, в частности методов нелинейного программирования.

5. Проверка адекватности и идентификация операторов рассматриваемой ФТС.

На этапе решения задач идентификации ФТС рассматривается не как самостоятельный объект исследования (как это было на этапе качественного анализа структуры ФТС и на этапе синтеза структуры функционального оператора системы), а совместно с контрольно-измерительными приборами (КИП), позволяющими судить о поведении объекта по данным наблюдения. ФТС совместно с КИП характеризуется координатами трёх типов: координатами управления, состояния, наблюдения, а также набором параметров объекта, которые могут быть неизвестны. Координаты управления, состояния, наблюдения и параметры объекта тесно связаны между собой. Для характеристики этой связи используются понятия *управляемости, наблюдаемости и идентифицируемости* [4].

Энергоресурсосберегающие процессы характеризуются n – мерным вектором состояний $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^m$, $\mathbf{r}$ – мерным вектором управления $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_r)^m$, m – мерным вектором наблюдения $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)^m$ (по числу измерительных приборов), причём на показания измерительных приборов накладывается как собственный “приборный” шум $\mathbf{v}(t)$, так и шум объекта $\mathbf{w}(t)$.

Формализм процесса представляется в канонической или нормальной форме уравнений состояния

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{a}(t), \mathbf{w}(t), t) \quad (7)$$

и наблюдения

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{a}(t), \mathbf{w}(t), \mathbf{v}(t), t), \quad (8)$$

где $\mathbf{a}(t)$ – k -мерный вектор неизвестных параметров системы, состоящей из коэффициентов системы дифференциальных уравнений, а также статистических характеристик (средних значений и дисперсий) шума $\mathbf{w}(t)$ и помех измерений $\mathbf{v}(t)$.

В общем случае (7) – система нелинейных стохастических дифференциальных уравнений, порядок которой заранее неизвестен. Часто структура математической модели процесса известна заранее либо на основе физико-химических и энергетических (эксергетических) особенностей его протекания, либо на основе формальных методов синтеза операторов ФТС. Поэтому данная работа посвящена тем аспектам идентификации, которые связаны с определением неизвестных параметров и оценкой переменных состояния объекта при фиксированной структуре математической модели [4]. Задача оценки переменных состояния процессов ДФТС, к которым можно отнести температуру, давление, состав фаз, расходы жидких и газообразных сред, энергию (эксергию) потоков и сред и т.д., состоит в том, чтобы по показаниям измерительных приборов, функционирующих в условиях случайных помех, восстановить значения переменных состояния системы, наиболее близкие в смысле заданного критерия к истинным значениям.

В соответствии с идеологией топологэксергетического метода [5-8] вводится обобщенная эксергоэкономическая диссипативная функция (ОЭЭДФ), отражающая все виды эксергоэкономических затрат при функционировании ФТС. ОЭЭДФ представляется на основе эксергоэкономических обобщенных усилий и потоков [5-8]. При этом произведение эксергоэкономического обобщенного усилия на обобщенный поток дает показатель «денежный поток во времени», который является аналогом экономической мощности в ФТС.

6. Эксергоэкономическая оптимизация и синтез структуры ФТС. Определение устойчивости динамической ФТС. Методика исследования областей устойчивости ФТС, связанных с эксергией и устойчивым развитием.

В соответствии со стратегией метода эксергоэкономическую эффективность энергосбережения можно оценить на основании следующих показателей.

Эксергоэкономического критерия-ОТД^э, определяемого как

$$\text{ОТД}^{\text{э}} = \frac{\text{ОЭЭДФ}}{\sum E^{\text{э}}_{\text{вх}}}, \quad (9)$$

где **ОЭЭДФ** – обобщенная эксергоэкономическая диссипативная функция анализируемой или синтезируемой ФТС, определяемая по аналогии с зависимостями работ [9-11]:

$$\text{ОЭЭДФ} = \sum_1^n d^{\text{э}}_{\text{внп}} + \sum_1^m d^{\text{э}}_{\text{зм}} = \text{ОЭЭДФ}_{\text{внп}} + \text{ОЭЭДФ}_{\text{зм}}, \quad (10)$$

где $d^{\text{э}}_{\text{внп}}$ – слагаемые, определяющие экономические потери эксергии за счет энергообмена с внешней средой; $d^{\text{э}}_{\text{зм}}$ – экономические потери эксергии за счет необратимых внутренних процессов; $\sum E^{\text{э}}_{\text{вх}}$ – эксергоэкономическая мощность, подаваемая на вход ФТС.

ОТД^э-критерий отражает степень экономической диссипации эксергии внутри ФТС и при взаимодействии ее с окружающей средой (внутренние и внешние экономические потери). Этот критерий позволяет выразить эксергоэкономические потери в долях от всех видов эксергоэкономических мощностей (механической, тепловой, электрической, химической и т.д.), поступающих на вход ФТС. При этом эксергоэкономический критерий-ОТД^э зависит от конструктивно-технологических и экологических параметров анализируемых и синтезируемых систем.

Обобщенная эксергоэкономическая диссипативная функция ОЭЭДФ может быть представлена уравнением:

$$\text{ОЭЭДФ} = \text{ОЭЭДФ}_{\text{пол}} + \text{ОЭЭДФ}_{\text{д}} = \sum E_{\text{вх}} - \sum E_{\text{вых}}, \quad (11)$$

где **ОЭЭДФ_{пол}** – полезные эксергоэкономические затраты в обобщенной эксергоэкономической диссипативной функции; **ОЭЭДФ_д** – диссипативная составляющая в обобщенной эксергоэкономической диссипативной функции; $\sum E_{\text{вых}}$ – эксергоэкономическая мощность на выходе ФТС.

Тогда **ОТД^э**-критерий примет вид:

$$\text{ОТД}^{\text{э}} = \frac{\text{ОЭЭДФ}_{\text{пол}}}{\sum E^{\text{э}}_{\text{вх}}} + \frac{\text{ОЭЭДФ}_{\text{д}}}{\sum E^{\text{э}}_{\text{вх}}}. \quad (12)$$

Если **ОЭЭДФ** ФТС отнести к использованной в системе эксергоэкономической мощности $\sum E^{\text{э}}_{\text{вх}} - \sum E^{\text{э}}_{\text{вых}}$, то получим

$$\eta^{\text{э}}_{\text{е}} + \eta^{\text{э}}_{\text{пот}} = \frac{\text{ОЭЭДФ}_{\text{пол}}}{\sum E^{\text{э}}_{\text{вх}} - \sum E^{\text{э}}_{\text{вых}}} + \frac{\text{ОЭЭДФ}_{\text{д}}}{\sum E^{\text{э}}_{\text{вх}} - \sum E^{\text{э}}_{\text{вых}}}, \quad (13)$$

где $\eta^{\text{э}}_{\text{е}}$ – эксергоэкономический к.п.д. ФТС; $\eta^{\text{э}}_{\text{пот}}$ – эксергоэкономический коэффициент диссипативных потерь эксергии в ФТС.

Уравнение (13) применяют для оценки эксергоэкономической эффективности ФТС.

Интегрирование выражения (9) во времени позволяет определить внешнюю и внутреннюю эксергоэкономическую диссипацию ФТС в заданном временном интервале:

$$E^{\text{отд}} = \frac{1}{t} \int_0^{\tau} \text{ОТД}^{\text{э}}(t) dt, \quad (14)$$

где $E^{\text{отд}}$ – интегральный критерий внешней и внутренней диссипации (потерь) эксергоэкономической мощности ФТС.

Интегрирование выражения $\eta^{\text{пот}}$ позволяет определить интенсивность диссипации эксергоэкономической мощности ФТС в заданном временном интервале:

$$E^{\text{д}} = \frac{1}{t} \int_0^{\tau} \eta^{\text{пот}}(t) dt, \quad (15)$$

где $E^{\text{д}}$ – интегральный критерий интенсивности внутренних потерь эксергоэкономической мощности.

Рассмотрены критерии оценки эксергоэкономической эффективности ФТС, на основе которых проводится эксергоэкономическая оптимизация и синтез её структуры.

При исследовании областей устойчивости ФТС, связанных с эксергией, окружающей средой и устойчивым развитием, на заданном множестве значений параметров исследуемой модели трудно выделить подмножество, на котором будет устойчива возмущённая динамика системы. Существенное затруднение при решении этой задачи возникает даже в тех случаях, когда можно составить систему аналитических неравенств, определяющих условие устойчивости [4, 12]. С помощью аппарата ЛА-функций можно свести такого рода задачу к вычислительным алгоритмам, реализуемым на ЭВМ.

Из этого следует, что задача устойчивости возмущённой динамики систем, связанных с их эксергией, экономикой, окружающей средой и устойчивым развитием, сведена к однообразной процедуре исследования ЛА-функций от определителей Гурвица. Таким образом, подмножество области устойчивости на множестве эксергетических параметров, эко-эксергетических индикаторов, конструктивно-технологических и экономических параметров моделей и т.д. может быть построено при исследовании функции на максимум в допустимом множестве D с помощью различных численных методов типа случайного поиска, Гаусса-Зейделя, быстрого спуска или Монте-Карло [11, 12].

7. Выбор термодинамических принципов управления энергоресурсосбережением ФТС.

Решение задачи управляемости ФТС с точки зрения энергоресурсосбережения требует предварительной формулировки основных принципов управления термодинамическими процессами, используя особый подход к смыслу времени для них. Этот подход вводит следующий аспект понятия традиционной термодинамики – определение границ, т.е. представление ограничивающей роли времени в термодинамическом процессе. В частности мы ищем экстремальные зависимости, особенно те, которые максимизируют работу и минимизируют производство энтропии. Эти вопросы составляют сущность управления термодинамическими процессами.

Рассмотрим десять основных принципов (0-9) управления термодинамическими процессами для того, чтобы получить границы эффективности преобразования энергии за конечное время [13, 14]. Представленные принципы делятся на три категории:

- *принципы упрощения проблемы (принципы 0,1,2);*
- *принципы, связанные с минимальным производством энтропии (принципы 3-6,9);*
- *принципы, связанные с максимальной мощностью (принципы 7,8).*

Последние две категории представляют крайности стратегий: *напрячь - все - силы* и *экономить - на - завтра*. Экономические оптимумы всегда выбирают стратегию где-то между этими двумя крайностями.

Разработанный нами **термодинамический принцип управления ресурсоэнергосбережением** базируется на сформулированном ранее ТД-критерии [13, 14]:

$$\text{ТД} = \epsilon - (\Phi + \Psi), \quad (16)$$

где $\epsilon \equiv \text{ОЭД}\Phi \equiv \sum_{i=1}^N f_i e_i$ – производство потерь эксергии;

Φ и Ψ – обобщенные модифицированные функции рассеяния Рэлея:

$$\Phi \equiv \Phi(f, f) \equiv \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^N R_{ik} f_i f_k \geq 0, \quad (17)$$

$$\Psi \equiv \Psi(e, e) \equiv \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^N L_{ik} e_i e_k \geq 0; \quad (18)$$

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 (16) показывает отклонение реального производства потерь эксергии от суммы обобщенных модифицированных функций рассеяния Рэлея (17) и (18). Данный принцип является локальным дифференциальным принципом наименьшего рассеяния эксергии, 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:

$$\int_V [(\Phi + \Psi) - \epsilon] dV = \min. \quad (19)$$

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

Выводы. Рассмотрены этапы стратегии системного анализа энергоресурсосбережения ФТС:

- синтез функционального оператора ФТС на основе топологоэксергетического принципа описания физико-технологических систем;
- проверка адекватности и идентификация операторов рассматриваемой ФТС; эксергоэкономическая оптимизация и синтез структуры ФТС;
- определение устойчивости динамической ФТС;
- выбор термодинамических принципов управления энергоресурсосбережением ФТС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Долгополов И.С. Повышение энергетической эффективности физико-технологических систем и функциональные операторы как инструменты решения этих задач (часть 1) / И.С.Долгополов // Збірник наукових праць Дніпродзержинсь-

- кого державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДГТУ. – 2007. – С.126-134.
2. Долгополов И.С. Повышение энергетической эффективности физико-технологических систем и функциональные операторы как инструменты решения этих задач (часть 2) / И.С.Долгополов // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДГТУ. – 2008. – С.141-147.
 3. Кафаров В.В. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии / В.В.Кафаров, И.Н.Дорохов. – М.: Наука, 1976. – 500с.
 4. Современные методы идентификации систем: пер. с англ. / [Эйкхофф П., Ванечек А., Савараги Е. и др.]; под ред. П.Эйкхоффа. – М.: Мир, 1983. – 400с.
 5. Долгополов И.С. Обобщенная эксергодиссипативная функция как основа тополого-эксергетического анализа физико-технологических систем / И.С.Долгополов, В.Т.Тучин // Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: НМетАУ. – 2002. – Т. 5. – С.67-71.
 6. Экономические аспекты топологоэксергетического метода моделирования физико-технологических систем / Кашеева Н.Ю., Долгополов И.С., Тучин В.Т., Рышков А.В. // Проблеми математичного моделювання: Міждерж. наук.-метод. конф., 28-30 травня 2008 р.: тези доповідей. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2008. – С.91-92.
 7. Эксергоэкономический анализ физико-технологических систем (топологоэксергетический подход). Часть 1, 2// Тучин В.Т., Долгополов И.С., Садовой А.В., Касимов А.М. // Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровье человека, утилизация отходов: XVIII Междунар. науч.-практ. конф.: сб. научных статей в 2-х т. Т.1. – УкрГНТЦ «Энергосталь» – Харьков: Райдер, 2010. – С.242-251.
 8. Системный анализ и устойчивое развитие физико-технологических систем (топологоэксергоэкономический подход) / Тучин В.Т., Долгополов И.С., Садовой А.В. и др. // Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: VI Між нар. наук.-практ. конф.: зб. наук. ст. у 2-х т. Т.2. – УкрНДІЕП – Х.: Райдер, 2010. – С.265-275.
 9. Долгополов И.С. Эксергетический аспект в системе фундаментальных уравнений ФТС/ Долгополов И.С., Никулин А.В., Тучин В.Т. // Системні технології. – 2003. – № 6(29). – С.64-68.
 10. 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.
 11. Энергетические аспекты топологоэксергетического метода описания физико-технологических систем (ФТС). Часть 2 / Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братута Э.Г., Тучина У.Н // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2005. – № 1. – С.36-42.
 12. Кафаров В.В. Применение алгебры логики в задаче устойчивости гидродинамики фонтанирующего слоя / Кафаров В.В., Дорохов И.Н., Тучин В.Т. – Днепропетровск, 1979. – Депон. рук. в ВИНТИ. – 1979, № 1. – 3097-78(79), б/о, № 155.10
 13. Термодинамические принципы управления энергоресурсосбережением и функциональные операторы физико-технологических систем (часть 2) / Тучин В.Т., Долгополов И.С., Садовой А.В. [и др.]. // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2008. – № 2. – С.48-55.
 14. Долгополов И.С. Научные основы энергоресурсосбережения с позиций эксерго- и энергоэффективного анализа физико-технологических систем / Долгополов И.С., Тучин В.Т., Садовой А.В. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2013. – 379с.

Поступила в редколлегию 11.04.2014.