

3. Теплотехнические расчёты металлургических печей / [Китаев Б.И., Зобнин Б.Ф., Ратников В.Ф. и др.]; под ред. А.С.Телегина. – М.: Металлургия, 1970. – 528с.
4. Невский А.С. Лучистый теплообмен в печах и топках / Невский А.С. – М.: Металлургия, 1993. – 439с.
5. Расчёт нагревательных печей / [Гольдфарб Э.М., Кравцов А.Ф., Радченко И.И. и др.] – К.: Гостехиздат, 1996. – 421с.

Надійшла до редколегії 03.09.2015.

УДК 62.50:513.83

ДОЛГОПОЛОВ И.С., к.т.н., доцент  
ТУЧИН В.Т., инженер  
САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор

Днепродзержинский государственный технический университет

### ТОПОЛОГОЭКСЕРГООЭКОНОМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Введение.** В современных технологических системах используется, как правило, несколько форм энергии. Разработка методов математического описания преобразований и взаимодействий форм энергии в процессе функционирования рассматриваемой системы имеют определяющее значение в решении задач энергоресурсосбережения. Важным звеном в решении этих задач является поиск подходов к разработке единых физико-технических критериев в оценке энергетической ценности энергоносителей, поступающих в систему. Это позволит установить экономически справедливые цены на энергоносители.

Одним из направлений в решении задач энергоресурсосбережения является разработанный нами топологоэксергетический подход к математическому моделированию физико-технологических систем (ФТС), основные принципы которого представлены в работах [1-6]. В [7, 8] рассмотрены особенности эксергэкономического моделирования ФТС и применение топологоэксергэкономического подхода в математическом моделировании гидравлической системы.

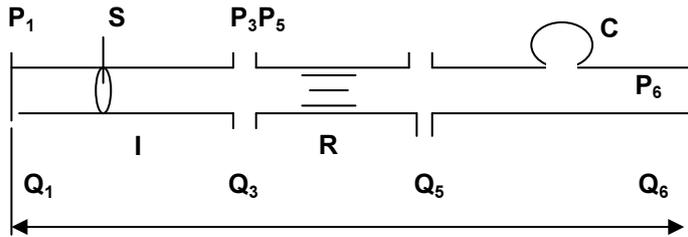
В предлагаемой работе рассмотрены результаты топологоэксергэкономического моделирования конкретной гидравлической системы. Разработанная математическая модель может применяться как часть моделей ФТС, в которых используется несколько форм энергии различной физической природы (например, системы горячего водоснабжения, отопления и т.п.).

**Постановка задачи.** Представить эксергэкономический модуль и результаты топологоэксергэкономического моделирования гидравлической системы, рассмотренной в работе [8].

**Результаты работы.** Схема моделируемой системы представлена на рис.1.

При моделировании гидравлического трубопровода (цепи) [9] примем допущения: 1) гидравлический трубопровод (цепь) представляется как набор элементов с сосредоточенными параметрами (участок ускорения, участок гидравлического сопротивления и участок деформации стенок трубопровода); 2) движение жидкости в трубопроводе характеризуется усреднёнными в поле скоростей и давлений характеристиками: объёмным расходом  $Q$  и давлением  $P$ ; 3) гидравлическая цепь моделируется как линии электропередачи, импедансы которой соответствуют отдельным участкам гидравлической системы; 4) в качестве жидкости используется вода.

На рис.2 показана схема, представляющая алгоритм описания ФТС с использованием аппарата топологических методов.

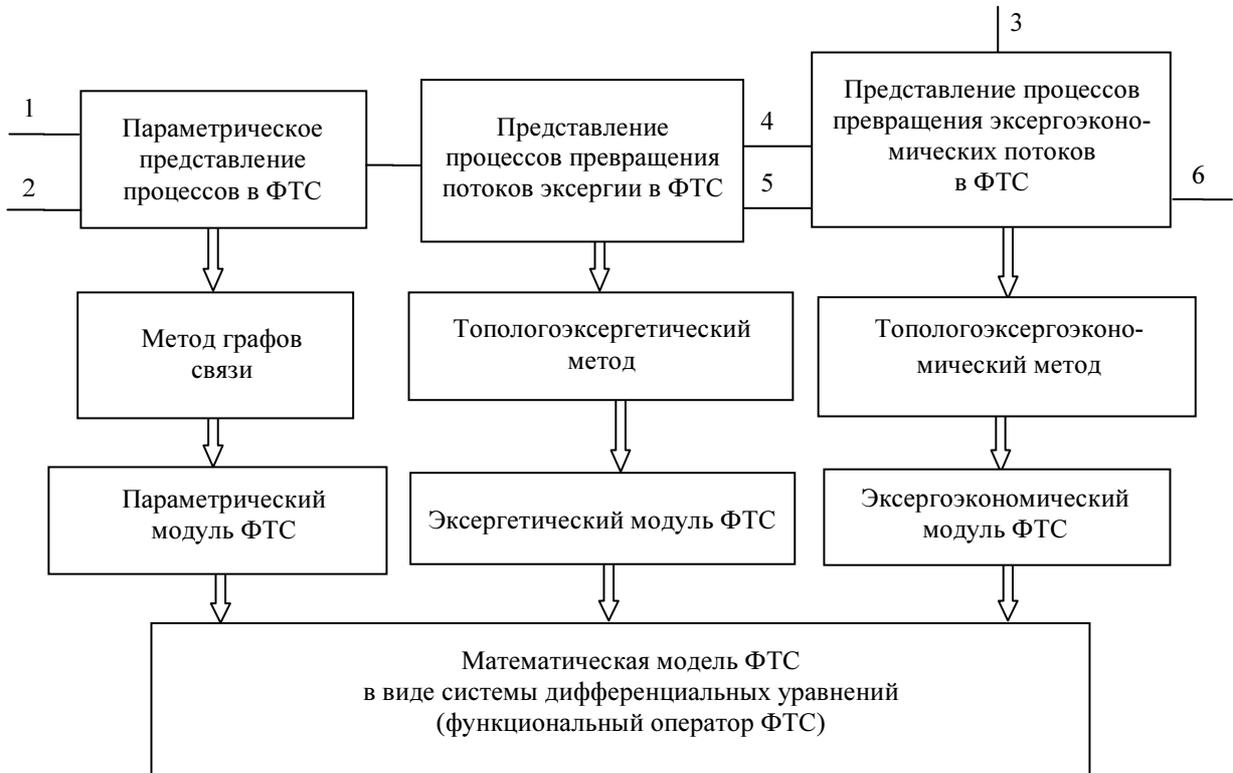


$P_1, P_3, P_5, P_6$  – давление потока в точках 1, 3, 5, 6 трубопровода;  $Q_1, Q_3, Q_5, Q_6$  – расход среды в точках 1, 3, 5, 6 трубопровода;  $R$  – гидравлическое сопротивление трубопровода;  $I$  – элемент гидравлической инерции трубопровода;  $C$  – гидравлическая емкость трубопровода

Рисунок 1 – Схема гидравлической системы

Для параметрического, эксергетического и эксергоэкономического представления процессов разработан формализованный аппарат топологического описания в соответствии с разработанной стратегией системного анализа энергоресурсосбережения в ФТС [1].

В табл.1 представлена система энергетических, эксергетических и эксергоэкономических обобщенных переменных усилий и потоков. Особенностью этой системы переменных



1, 2, 3 – параметры потоков энергии (эксергии), материалов и финансов на входе ФТС соответственно; 4, 5, 6 – параметры потоков энергии (эксергии), материалов и финансов на выходе ФТС соответственно

Рисунок 2 – Алгоритм получения математического описания ФТС с использованием аппарата топологических методов

является то, что они описывают энергетические процессы в ФТС с использованием обобщенных переменных усилия и потока в параметрическом, эксергетическом и эксергоэкономическом виде. При этом в каждом виде описания произведение обобщенных переменных является мощностью потока, т.е. фактической работоспособностью энергии (эксергии) во времени, измеряемой в Вт. Оценка этой работоспособности (эксергии) в денежном выражении во времени измеряется финансовым потоком грн.(\$)/с.

Таблица 1 – Обобщенные переменные в диаграмме связи, топологоэксергетической и топологоэксергоэкономической структурах связей

Обобщенные переменные усилия и потока	Обозначение	Единица измерения
<b>Параметрическое описание</b>		
Давление	P	Па
Объемный расход	Q	м <sup>3</sup> /с
Мощность потока	P · Q	Вт (Дж/с)
<b>Эксергетическое описание</b>		
Удельная эксергия	$e_{\Gamma} = P / \rho$ , $\rho$ – плотность потока	Дж/кг кг/м <sup>3</sup>
Массовый расход	$\dot{m}$	кг / с
Мощность потока	$e_{\Gamma} \cdot \dot{m}$	Вт (Дж/с)
<b>Эксергоэкономическое описание</b>		
Удельная цена эксергии источника	$c^{\text{ЭК}}$	грн(\$)/Дж
Поток мощности	$f^{\text{ЭК}}$	Вт (Дж/с)
Мощность финансового потока	$c^{\text{ЭК}} \cdot f^{\text{ЭК}}$	грн(\$)/с

Детальное описание стратегии предлагаемого подхода при анализе ФТС, содержание этапов параметрического, топологоэксергетического и эксергоэкономического моделирования рассматриваемой системы представлено в [8]. В этой работе показано получение аналитических формы диссипатора, элемента инерции потока в трубопроводе и емкости трубопровода с эксергетических позиций.

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dQ_2}{dt} &= (P_1 - \frac{8 \cdot \xi \cdot l \cdot \rho \cdot Q_2^2}{\pi^2 \cdot D^5} - P_5) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \rho \cdot l} \\
 \frac{dP_5}{dt} &= \frac{4 \cdot P_5 \cdot (Q_2 - Q_6)}{\pi \cdot D^2 \cdot l} \\
 \frac{d\dot{m}_2}{dt} &= \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot (e_1^{\Gamma} - \frac{8 \cdot \xi \cdot l \cdot \dot{m}_2^2}{\pi^2 \cdot \rho^2 \cdot D^5} - e_5^{\Gamma})}{4 \cdot l} \\
 \frac{de_5^{\Gamma}}{dt} &= \frac{4 \cdot e_5^{\Gamma} \cdot (\dot{m}_2 - \dot{m}_6)}{\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot l} \\
 \frac{d\dot{f}_2^{\text{ЭК}}}{dt} &= \frac{(c_1^{\text{ЭК}} - c_1^{\text{ЭК}} \cdot \frac{1}{e_1^{\Gamma}} \cdot \frac{8 \cdot \xi \cdot \dot{m}_2^2 \cdot l}{\rho^2 \cdot \pi^2 \cdot D^5} - c_5^{\text{ЭК}}) \cdot (e_2^{\Gamma})^2 \cdot \rho \cdot \pi \cdot D^2 \cdot e_1^{\Gamma}}{\left[ c_1^{\text{ЭК}} \cdot e_1^{\Gamma} - (c_1^{\text{ЭК}})^2 \cdot \frac{1}{f_2^{\text{ЭК}} \cdot e_1^{\Gamma}} \cdot \frac{8 \cdot \xi \cdot \dot{m}_2^2 \cdot l}{\rho^2 \cdot \pi^2 \cdot D^5} \cdot \dot{m}_2 - c_5^{\text{ЭК}} \cdot e_1^{\Gamma} \right] \cdot 4l} \\
 \frac{dc_5^{\text{ЭК}}}{dt} &= \frac{4 \cdot c_5^{\text{ЭК}} \cdot (\dot{f}_2^{\text{ЭК}} - \dot{f}_6^{\text{ЭК}})}{e_5^{\Gamma} \cdot \pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot l}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

В результате получена система уравнений (1), описывающая параметрическую, эксергетическую и эксергоэкономическую динамику моделируемой ФТС.

В уравнениях системы (1) приняты обозначения:

$\rho$  – плотность потока  $\text{кг/м}^3$ ;  $l$  – длина трубопровода, м;  $D$  – диаметр трубопровода, м;  $\xi$  – коэффициент трения;  $Q_2$  – объёмный расход жидкости в трубопроводе;  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $P_5$  – давление жидкости в трубопроводе, Па;  $\dot{m}_2$  – массовый расход жидкости в трубопроводе,  $\text{кг/с}$ ;  $e_5^\Gamma$  – удельная эксергия жидкости в ёмкостном элементе,  $\text{Дж/кг}$ ;  $c_1^{\text{ЭК}}$  – цена единицы эксергии на входе в трубопровод,  $\text{грн/Дж}$ ;  $f_1^{\text{ЭК}}$  – поток эксергии,  $\text{Дж/с}$ ;  $c_6^{\text{ЭК}}$  – цена единицы эксергии на выходе трубопровода,  $\text{грн/Дж}$ ;  $f_6^{\text{ЭК}}$  – поток эксергии на выходе тракта трубопровода,  $\text{Дж/с}$ ;  $f_2^{\text{ЭК}}$  – поток эксергии в тракте трубопровода,  $\text{Дж/с}$ ;  $c_5^{\text{ЭК}}$  – цена единицы эксергии, отражающая эксергоэкономические ёмкостные свойства гидравлического тракта трубопровода,  $\text{грн/Дж}$ .

На основе системы уравнений (1) разработан модуль для расчета параметрических, эксергетических и эксергоэкономических характеристик рассматриваемой системы в динамике, представленный ниже.

$P1 = 160000 \text{ Па}$ ;  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $PH = 150000 \text{ Па}$ ;  $e1 = P1/\rho$ ;  $e1 = 160 \text{ Дж/кг}$ ;  $l = 20 \text{ м}$ ;  
 $Q1 = 0.2 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $Q6 = 0.2 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $D = 0.4 \text{ м}$ ;  $\xi = 0.03$   
 $m6 = \rho \cdot Q6$ ;  $m6 = 200 \text{ кг/с}$

$$B(t, y) := \begin{bmatrix} \left[ P1 - \frac{8 \cdot \xi \cdot l \cdot \rho \cdot (y_0) \cdot y_0}{\pi^2 \cdot D^5} - y_1 \right] \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \rho \cdot l} \\ \left[ \frac{4 \cdot y_1 \cdot (y_0 - Q6)}{\pi \cdot D^2 \cdot l} \right] \\ \left[ \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \left[ e1 - \frac{8 \cdot \xi \cdot l \cdot (y_2)^2}{\pi^2 \cdot \rho^2 \cdot D^5} - y_3 \right]}{4 \cdot l} \right] \\ \left[ \frac{4 \cdot y_3 \cdot (y_2 - m6)}{\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot l} \right] \\ \left[ e1 - \frac{8 \cdot \xi \cdot l \cdot (y_2) \cdot y_2}{\pi^2 \cdot \rho^2 \cdot D^5} - y_3 \right] \cdot y_2 \\ \left[ (y_3) \cdot y_2 - y_3 \cdot m6 \right] \cdot \frac{y_5 \cdot 4}{\pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot l \cdot y_3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$y0 := \begin{pmatrix} 0.196 \\ 150000 \\ 196 \\ 150 \\ 2.94 \times 10^4 \\ 20 \end{pmatrix}$$

$$t_0 := 0 \quad t_1 := 300 \quad M := 300$$

$$U := \text{Rkadapt}(y_0, t_0, t_1, M, B)$$

На рис.3-8 представлены расчетные зависимости изменения во времени объемного расхода и давления воды, массового расхода и удельной эксергии потока, мощности потока воды и удельной цены эксергии потока в трубопроводе (цена удельной эксергии потока взята условно). Из этих зависимостей можно заключить, что изменение во времени параметров, характеризующих динамику эксергетической и эксергоэкономической картины процессов в рассматриваемой системе имеет аналогичный характер.

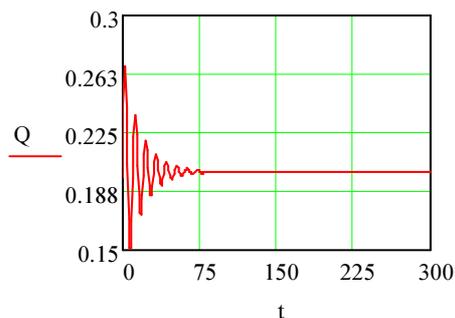


Рисунок 3 – Зависимость изменения объемного расхода воды  $Q$  ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) в трубопроводе во времени  $t$ , с

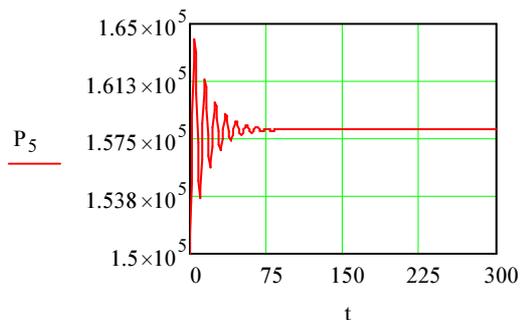


Рисунок 4 – Зависимость изменения давления воды  $P_5$  (Па) в трубопроводе во времени  $t$ , с

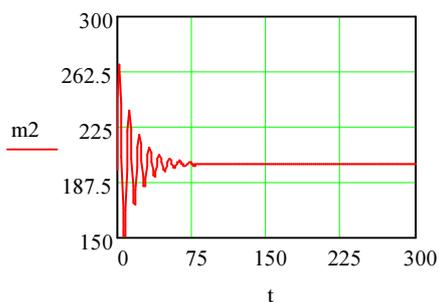


Рисунок 5 – Зависимость изменения массового расхода воды  $m_2$  ( $\text{кг}/\text{с}$ ) в трубопроводе во времени  $t$ , с

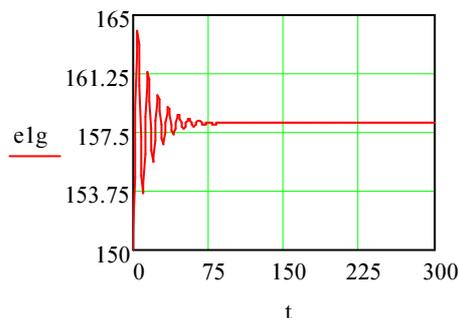


Рисунок 6 – Зависимость изменения удельной эксергии воды  $e_{1g}$  ( $\text{Дж}/\text{кг}$ ) в трубопроводе во времени  $t$ , с

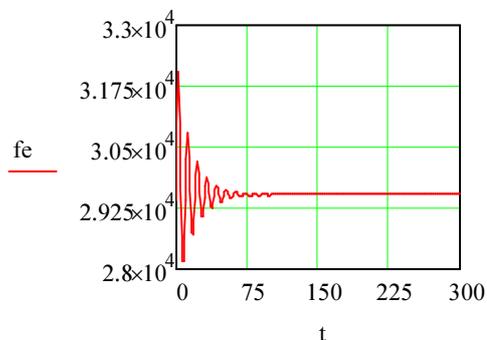


Рисунок 7 – Зависимость изменения мощности потока воды  $f_e$  (Вт) на выходе трубопровода во времени  $t$ , с

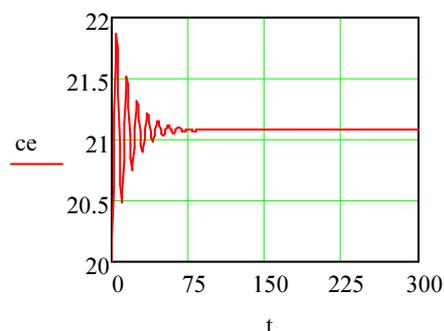


Рисунок 8 – Зависимость изменения цены удельной эксергии потока воды  $c_e$  (грн/Дж) в трубопроводе во времени  $t$ , с

Приведенная математическая модель гидравлической системы позволяет определить её эксергоэкономическую эффективность:

$$\eta_{еке} = \frac{N_{ПВЫХ} \cdot C_{еВЫХ}}{N_{ПВХ} \cdot C_{еВХ}}, \quad (3)$$

где  $N_{ПВЫХ}$  – мощность потока гидравлической энергии на выходе трубопровода, Вт;  $N_{ПВХ}$  – мощность потока гидравлической энергии на входе трубопровода, Вт;  $C_{еВЫХ}$  – цена удельной эксергии потока гидравлической энергии на выходе из трубопровода, грн (\$)/Дж;  $C_{еВХ}$  – цена удельной эксергии потока гидравлической энергии на входе трубопровода, грн (\$)/Дж.

На рис.9 представлен график зависимости эксергоэкономического критерия эффективности  $\eta_{еке}$  рассматриваемой системы во времени. Этот график показывает, что на выходе из трубопровода установившийся финансовый поток, соответствующий цене передаваемой мощности гидравлической энергии на выходе трубопровода, наступает через 145 с и составляет долю 0,893 от цены мощности потока, подаваемого на вход трубопровода.

В наших разработках получен эксергоэкономический TDe-критерий, показывающий отношение разности финансовых потоков, отражающих эксергетическую мощность гидравлической энергии, между входом и выходом трубопровода к финансовому потоку, отражающему эксергетическую мощность потока гидравлической энергии на входе в трубопровод. На рис.10 приведена кривая изменения коэффициента эксергоэкономической эффективности и эксергоэкономического TDe-критерия рассматриваемой ФТС. Из графика зависимости TDe-критерия во времени следует, что в неустановившемся режиме система потребляет до 15% вводимого в систему финансового потока, в установившемся – 10,7%.

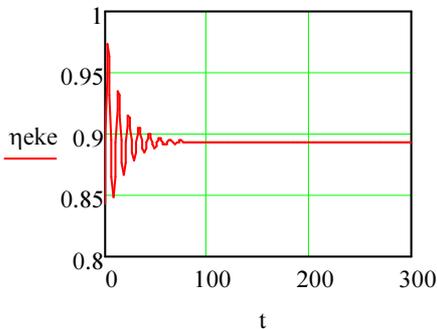


Рисунок 9 – Зависимость изменения эксергоэкономической эффективности  $\eta_{еке}$  ФТС во времени  $t, c$

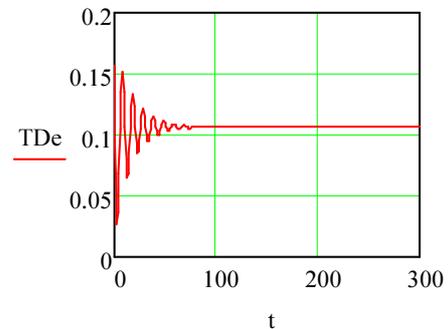


Рисунок 10 – Зависимость изменения эксергоэкономического TDe-критерия эффективности ФТС во времени  $t, c$

Из анализа результатов расчетов, представленных на рис.3-10, следует, что на параметрическую, эксергетическую и эксергоэкономическую эффективность рассматриваемой системы влияют ее конструктивные и технологические параметры. Функциональный оператор этой ФТС, представленный системой уравнений (1), модуль функционального оператора (2) позволяют оценить влияние указанных параметров на динамику параметрической, эксергетической и эксергоэкономической эффективности физико-технологической системы. От выбора *технологических* параметров  $P$  (давление) и  $Q$  (расход) зависят уровень начальной работоспособности энергии и величина мощности, поступающей в систему и потребляемой ФТС.

От выбора *конструктивных* параметров  $l, D, \xi$  (длина трубопровода, внутренний диаметр трубы, коэффициент трения потока, как функция скорости потока и шерохова-

тости стенки), зависят диссипативные, инерционные и емкостные энергетические (эксергетические) характеристики системы, работающей в нестационарных режимах.

В целом предлагаемый подход позволяет определить направления энергоресурсосбережения в ФТС и оценить их эксергоэкономическую эффективность.

#### **Выводы.**

1. Рассмотрена идеология топологэксергоэкономического подхода к анализу физико-технологических систем.

2. Приведены результаты математического моделирования физико-технологической системы на примере гидравлической системы и показаны ее параметрические, эксергетические и эксергоэкономические характеристики в динамическом режиме.

3. Модель разработана для анализа эффективности ФТС, в которых используется несколько форм энергии различной физической природы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Долгополов И.С. Научные основы энергоресурсосбережения с позиций эксерго- и энергоэффективного анализа физико-технических систем / И.С.Долгополов, В.Т.Тучин, А.В.Садовой. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2013. – 379с.
2. Долгополов И.С. Топологэксергетический метод моделирования физико-технологических систем (ФТС) / Долгополов И.С., Тучин В.Т. // V Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer. May 24-28, Minsk, 2004, Секция 8. – С.8-14.
3. Энергетические аспекты топологэксергетического метода анализа 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.
4. Энергетические аспекты топологэксергетического метода анализа 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.
5. Тучин В.Т., Долгополов И.С. Основы формализма топологэксергетического метода моделирования физико-технологических систем// Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета: (технические науки).- Днепродзержинск: ДГТУ, 2006.- С.202-213.
6. Экономические аспекты топологэксергетического метода моделирования физико-технологических систем / Кашеева Н.Ю., Долгополов И.С., Тучин В.Т., Рышков А.В. // Проблеми математичного моделювання: міждерж. наук.-метод. конф., травень 2008 р.: тези доповідей. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2008. – С.91-92.
7. Эксергоэкономический анализ физико-технологических систем (топологэксергетический подход). Часть 1 / 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., сентябрь 2010 г.: сборник научных статей в 2-х т. Т.1. – УкрГНТЦ «Энергосталь» - Харьков: Райдер, 2010. – С.234-241.
8. Эксергоэкономический анализ физико-технологических систем (топологэксергетический подход). Часть 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., сентябрь 2010 г.: сборник научных статей в 2-х т. Т.2. – УкрГНТЦ «Энергосталь» - Харьков: Райдер, 2010. – С.241-251.
9. Rosenberg R.C. Introduction to Physical System Dynamics / Rosenberg R.C., Karnopp D.C. – New York: Mc Grow – Hill Inc., 1983. – 420p.

*Поступила в редколлегию 10.09.2015.*