

УДК 621.1.016.7: 502

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИИ В  
ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИНДУСТРИИ С УЧЕТОМ  
ТОПОЛОГОЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА**

**к.т.н., доц. Э.Е. Стрежекуров<sup>\*</sup>, к.т.н., доц. В.А. Шаломов<sup>\*\*</sup>,  
к.т.н., доц. О.А. Вергун<sup>\*\*</sup>, к.т.н., доц. И.С. Долгополов<sup>\*</sup>,  
к.т.н., доц. Е.Д. Хмельницкий<sup>\*</sup>, студ. Л.О. Совгир<sup>\*</sup>**

*<sup>\*</sup>Днепродзержинский государственный технический университет,*

*<sup>\*\*</sup>Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры*

Актуальность. Важнейшими характеристиками современных технологий являются энергосбережение и их экологическая безопасность. В связи с ростом потребления энергии в промышленности и на транспорте окружающая среда загрязняется продуктами сгорания топлива. Из-за низкой термодинамической эффективности части используемых технологий и оборудования расходы энергии в них значительны, что ведет к существенному загрязнению окружающей среды.

Цель работы. Представить новый, топологоэксергетический метод исследования энергосбережения физико-технологических систем (ФТС).

Научная новизна. Впервые разработан топологоэксергетический метод анализа энергосбережения ФТС, основанный на использовании диаграмм связи.

Методика исследования. На основании теоретических разработок путем объединения преимуществ эксергетического и топологического (диаграмм связи) методов создан новый топологоэксергетический метод, позволяющий получать структуру расходования эксергии в ФТС и влиять на конструктивно-технологические параметры системы для достижения требуемой термодинамической эффективности.

В настоящее время основным методом исследования сложных объектов в науке, технике и экономике становится системный подход [1].

В анализе поведения сложных систем обобщающей концепцией является энергия, а универсальным инструментом изучения, разработки и совершенствования технических систем является эксергетический принцип [2].

Преимущества, которые свойственны эксергетическому и топологическому методам, целесообразно объединить в виде топологоэксергетического подхода к анализу указанных систем [3-5].

В основе топологоэксергетического метода лежит принцип системного подхода к анализу отдельного процесса технологии как сложной кибернетической системы, так называемой физико-технологической системы. Под ФТС понимаем объект, обладающий сложным внутренним строением, большим числом составных частей и элементов (самостоятельных и условно неделимых единиц), взаимодействующих между собой и окружающей средой, 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).

Создаваемый системный подход к решению задач энергосбережения ФТС на базе топологоэксергетического метода анализа и синтеза энергосберегающих технологий и оборудования включает следующие стратегические принципы:

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

Разработана обобщенная эксергодиссипативная функция физико-технологической системы, являющаяся основой топологоэксергетического метода [4].

Универсальную картину энергопотребления в физико-технологической системе может дать эксергетический баланс:

$$\sum E^{6X} = \sum E^{6bIX} + (\sum D + \sum \Delta E), \quad (1)$$

где  $\sum E^{BX}$  - сумма эксергий потоков материалов, тепловой, электрической, химической и механической энергии на входе в ФТС;  $\sum E^{Вых}$  - сумма эксергий потоков материалов, тепловой, электрической, химической и механической энергии на выходе из ФТС;  $\sum D$  - сумма эксергетических потерь;  $\sum \Delta E$  - составляющая баланса, характеризующая способность системы к накоплению эксергии.

В правой части (1) в скобках находятся составляющие, характеризующие потребление эксергии системой. Причем  $\sum D$  - сумма эксергетических потерь, характеризующих диссипативные свойства системы, которые в дальнейшем рассматриваются как эксергодиссипативная функция. Величину  $\sum \Delta E = \sum \Delta C + \sum \Delta I$ , отражающую способность ФТС накапливать эксергию, можно представить как сумму емкостной  $\sum \Delta C$  и инерционной  $\sum \Delta I$  форм в зависимости от видов энергии, используемых в ФТС. Особенности определения составляющих различных форм накопления эксергии  $\sum \Delta C$  и  $\sum \Delta I$  будут предметом отдельного рассмотрения.

Для систем любой сложности исходными категориями при описании физико-технологических процессов являются диссипативные потоки и движущие силы.

Опишем в общем виде диссипацию эксергии в физико-технологической системе, используя аппарат термодинамики необратимых неравновесных процессов.

Все виды энергозатрат в физико-технологической (инженерной) системе можно охарактеризовать эксергодиссипативной функцией  $\Sigma D$  :

$$\Sigma D^* = d_{эв} + d_{э}, \quad (2)$$

где  $d_{эв}$  - обобщенная внешняя эксергодиссипативная функция, отражающая диссипацию эксергии системы при ее взаимодействии с окружающей средой;  $d_{э}$  - обобщенная эксергодиссипативная функция физико-технологической системы, отражающая диссипацию эксергии внутри этой системы.

В [4] показано, что для ФТС обобщенная эксергодиссипативная функция  $\Sigma D^*$  может быть представлена как сумма произведений термодинамических сил  $e_{эi}$  на термодинамические потоки  $f_i$ :

$$\Sigma D^* = \sum_1^{n=i} e_{эi} \cdot f_i, \quad (3)$$

где  $e_{эi}$  отражает  $i$ -ое обобщенное усилие эксергетических потерь.

Такое представление обобщенной эксергодиссипативной функции дает возможность отразить структуру потребления эксергии в ФТС в виде топологоэксергетической структуры связи.

Решение задачи топологоэксергетическим методом предусматривает выполнение следующих этапов:

- 1) разработку кодовой топологоэксергетической диаграммы;
- 2) построение топологоэксергетической структуры связи;
- 3) получение системы уравнений на основе топологоэксергетической структуры связи;
- 4) решение системных уравнений.

С помощью разрабатываемого топологоэксергетического подхода анализировались различные физико-технологические системы: рекуперативный пластинчатый теплообменник, труба-сушилка и др. в стационарных режимах работы.

Рассмотрим результаты топологоэксергетического анализа пластинчатого теплообменника [5].

Для оценки термодинамической эффективности теплообменника воспользуемся эксергетическим КПД  $\eta_p$  - «отношением выходной эксергетической мощности потока нагреваемого воздуха к подведенной в теплообменник эксергетической мощности потоков:

$$\eta_p = \frac{e_6 m_6 \cdot 100}{(e_3 - e_{10}) m_3 + e_1 m_1} \%, \quad (4)$$

где  $e_1, e_6$  - удельные эксергии нагреваемого воздуха на входе и выходе теплообменника, Дж/кг;  $e_3, e_{10}$  - удельные эксергии горячего теплоносителя (продуктов сгорания) на входе и выходе рекуператора, Дж/кг;  $m_1, m_6$  - массовые расходы нагреваемого воздуха на входе и выходе теплообменника, кг/с;  $m_3$  - массовый расход горячего теплоносителя на входе и выходе теплообменника, кг/с.

Все величины, кроме  $e_6$ , в уравнении (3) заданы.

Аналитическое выражение для  $e_6$  получаем решением системных уравнений.

$$e_6 = e_1 + (e_3 - e_{10}) \cdot \frac{c_{\theta} \cdot (T_{cm2} - T_{cp}^{\theta})}{c_2 \cdot (T_{cp}^{\theta} - T_{cm1})} - m_3 \cdot \frac{c_{\theta} \cdot (T_{cm2} - T_{cp}^{\theta})}{c_2 \cdot (T_{cp}^{\theta} - T_{cm1})} \times \left[ R_{GT} \ln \left( 1 + \frac{\Delta P_{\theta}}{P_{\theta}} \right) + R_{\alpha 1}^{\theta} \right] - \frac{\lambda}{s} (T_{cm2} - T_{cp}^{\theta}) \cdot (T_{cm1} - T_{cm2}) \cdot R_{\lambda}^{\theta} - m_1 \cdot \left[ R_{\theta} \cdot \ln \left( 1 + \frac{\Delta P_{\theta}}{P_{\theta}} \right) + R_{\alpha 2}^{\theta} \right] \quad (5)$$

где  $c_{\theta}$  - средняя удельная массовая теплоёмкость воздуха, Дж/(кг град);  $c_{\Gamma}$  - средняя удельная массовая теплоёмкость продуктов сгорания, Дж/(кг град);  $T_{cp}^B, T_{cp}^{\theta}$  - температуры нагреваемого воздуха на входе и выходе теплообменника, К;  $T_1^{гор}, T_2^{гор}$  - температуры горячего теплоносителя на входе и выходе теплообменника, К;  $T_{CT1}$  - температура наружной стенки рекуператора, К;  $T_{CT2}$  - температура внутренней стенки рекуператора, К;  $R_{GT}$  - удельная газовая постоянная горячего теплоносителя (продуктов сгорания), Дж/(кг град);  $\Delta P_{\Gamma}$  - суммарные гидравлические потери по тракту горячего теплоносителя, Па;  $P_{\Gamma}$  - давление горячего теплоносителя на выходе из тракта, Па;  $R_{\theta}$  - удельная газовая постоянная воздуха, Дж/(кг град);  $\Delta P_{\theta}$  - гидравлическое сопротивление воздушного тракта рекуператора, Па;  $P_{\theta}$  - давление воздуха на выходе из рекуператора, Па;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности материала стенки теплообменника, Вт/(м град);  $s$  - толщина стенки теплообменника, м;  $R_{\alpha 1}^{\theta}$  - диссипатор, отражающий потерю эксергии при необратимом теплообмене между горячим теплоносителем и наружной стенкой рекуператора;  $R_{\lambda}^{\theta}$  - диссипатор, отражающий потерю эксергии при необратимом теплообмене в стенке рекуператора;  $R_{\alpha 2}^{\theta}$  - диссипатор, отражающий потерю эксергии при необратимом теплообмене между внутренней стенкой теплообменника и нагреваемым воздухом.

$$R_{\alpha 1}^{\vartheta} = f(K, T)_{\alpha}, \text{ Дж}/(\text{кг}^2 \cdot \text{с});$$

$$R_{\alpha 2}^{\vartheta} = f(K, T)_{\beta}, \text{ Дж}/(\text{кг}^2 \cdot \text{с});$$

$$R_{\lambda}^{\vartheta} = f(K, T)_{cm}, \text{ с} \cdot \text{м}^2 / (\text{кг} \cdot \text{град});$$

$K$  - конструктивные параметры теплообменника;  $T$  - технологические параметры теплообменника;  $\alpha$  - тракт горячего теплоносителя;  $\beta$  - тракт нагреваемого воздуха;

Уравнение (5) показывает, что топологоэксергетический метод дает возможность дать детальную оценку влияния конструктивно-технологических параметров рекуператора на величину удельной эксергии нагреваемого воздуха в теплообменнике. При этом аналитически отражено влияние на термодинамическую эффективность теплообменника всех составляющих потерь эксергии, связанных с необратимостью при преодолении гидравлических сопротивлений трактов теплоносителей и теплообмена при конечной разности температур, как на горячей, так и на холодной стороне теплообменника и в теплообменнике в целом. Эта информация особенно важна при проектировании теплообменных аппаратов.

Повышение термодинамической эффективности теплообменников, работающих в качестве утилизаторов теплоты продуктов сгорания, позволяет улучшить их энергетические, экономические и экологические показатели.

**Заключение.** Разрабатываемый топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем позволяет решать задачи повышения термодинамической эффективности физико-технологических систем и улучшения их экологических показателей.

### ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Кафаров В. В., Дорохов И. Н. Системный анализ процессов химической технологии. Основы стратегии. – М.: Наука, 1976. – 500 с.
2. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К., Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988 – 288 с.
3. Долгополов И. С., Тучин В. Т. Обобщенная эксергодиссипативная функция как основа топологоэксергетического подхода анализа физико-технологических систем. *Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины.* – Днепрпетровск: НМетАУ, т.5, 2002, С.67–71.
4. Братуга Э. Г., Долгополов И. С., Тучин В. Т. Топологоэксергетический подход к оценке энергозатрат в физико-технологических системах // *Интеграція технологій та енергозбереження*, 2003, №4, С.20–27.
5. Долгополов И. С. Пластинчатый теплообменник для подогрева воздуха // *Промышленная энергетика* №7. 2000 С.32–34.