

вершенствования теплоэнергетических установок // Вестн. Саратов. ГТУ. – 2004. – № 3(4). – С. 31–44.

4. *Эксергетический* расчет технических систем. Справочное пособие. Под ред. Долинского А.А. – К.: Наукова Думка, 1991. – 360 с.

5. *Эксергетический* метод и его приложения. Под ред. Бродянского В.М. – М.: Мир, 1967.–247 с.

6. *Бродянский В.М., Фратшер В., Михалек К.* Эксергетический метод и его приложения. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 388 с.

7. *Фиалко Н.М., Навродская Р.А., Прокопов В.Г., Пресич Г.А. Сингаевская С.И.* Проблема оптимизации параметров труб с поперечным оребрением в конденсационных теплоутилизаторах // Промышленная теплотехника. – 1999. – Т. 21, № 1. – С. 33–35.

8. *Шаргут Я., Петела Р.* Эксергия. – М.: Энергия, 1968. – 277 с.

Получено 14.03.2008 г.

УДК 536.24

**ШКЛЯР В.И.¹, ДОЛГОПОЛОВ И.С.², ТУЧИН В.Т.²,
ДУБРОВСКАЯ В.В.¹, КОВАЛЬ Ю.В.¹, ЗАДВЕРНЮК В.В.¹**

¹*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»*

²*Днепродзержинский государственный технический университет*

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ КОНТАКТНОГО АППАРАТА ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ (ТОПОЛОГОЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ ФОРМАЛИЗМ)

Виконано топологоексергетичний аналіз контактної тепломасообмінної апаратури. Наведено рівняння для розрахунку його ексергетичної ефективності з урахуванням ексергетичних втрат.

Выполнен топологоексергетический анализ работы контактного тепломасообменного аппарата. Приведены уравнения для расчета его эффективности с учетом эксергетических потерь.

The topological exergy analysis of the work of a contact heat and mass transfer apparatus is carried out. The equations for its exergy efficiency with regard for exergy losses are presented.

E – эксергия;

$F_{\text{см}}$ – смоченная поверхность насадки;

G – массовый расход сухого газа;

h – эльгальпия;

L – массовый расход охлаждающей воды;

m – массовый расход парогазовой смеси;

Q – тепловой поток;

S – энтропия;

t_1, t_2 – температуры парогазовой смеси соответственно на входе и выходе конденсатора;

$t_{\text{ж}1}, t_{\text{ж}2}$ – температуры охлаждающей воды соответственно на входе и выходе аппарата;

r – скрытая теплота парообразования;

w_1, w_2 – влагосодержание парогазовой смеси соответственно на входе и выходе конденсатора;

α – коэффициент конвективной теплоотдачи;

β – коэффициент массоотдачи;

η – КПД;

$\Delta t_{\text{лог}}$ – среднелогарифмический температурный напор;

ФТС – физико-технологическая система.

Индексы:

ОБ – общий;

ВХ – вход;

ВЫХ – выход;

Ж – жидкость;

МО – массообмен;

ПГС – парогазовая смесь;

ТО – теплообмен.

Современные теплоэнергетические и утилизационные установки являются сложными комплексами, анализ работы которых строится на исследовании энергетических потоков качественно и количественно неоднородных (неравноценных) для различных режимов работы установок. При разработке энергосберегающих технологий и проектировании нового оборудования важно иметь методы, позволяющие детально отображать процессы превращения энергии в исследуемом объекте.

Для оценки эффективности работы тепломаассообменного оборудования с энергетических позиций используют энергетический, эксергетический и энтропийный методы [1].

Дальнейшее развитие этих методов для решения задач повышения энергетической эффективности технических систем и энергосбережения состоит в представлении взаимосвязей конструктивно-технологических параметров с энергетическими параметрами технических систем, отражении эксергетической сути процессов при одновременном использовании энергетических источников различной физической природы, вскрытии динамических аспектов энергосбережения.

Создание энергоэффективных технологий и оборудования для их реализации возможно только при существовании научно обоснованной методологии системного подхода к анализу энергопотребления в объектах.

В представляемой статье указанная задача рассмотрена с позиций системного подхода, в качестве рабочего инструмента при анализе энергетических структур применяется тополого-эксергетический подход [2–9], позволяющий получить как топологоэксергетические, так и аналитические формы их представления. В основе топологоэксергетического метода (топологоэксергетического формализма) лежит принцип системного подхода к анализу отдельного процесса технологии как сложной кибернетической системы, так называемой физико-технологической системы [3]. В отличие от других методов, данный метод дает возможность выявить связи конструктивно-технологических параметров с потерями эксергии на реализацию процессов, протекающих в данном объекте, и позволяет отобразить влияние этих характеристик на его эксер-

гетическую эффективность в стационарных и нестационарных режимах его функционирования.

Стратегия этого подхода [2, 3, 9] предусматривает:

- 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;
- 5) идентификацию и проверку адекватности операторов ФТС.

В НТУУ “КПИ” совместно с Днепродзержинским государственным техническим университетом разрабатывается метод анализа работы контактного тепломаассообменного аппарата (рис. 1), основанный на топологоэксергетическом подходе.

Целью работы является применение топологоэксергетического формализма для описания эксергетических потерь, оценки и определения направлений повышения эксергетической эффективности контактного аппарата для охлаждения парогазовой смеси когенерационной установки.

Ограничения при решении задачи:

- 1) рассматривается стационарный режим работы аппарата;
- 2) аппарат представлен как объект с сосредоточенными параметрами.

Качественный анализ ФТС предусматривает разработку кодовой диаграммы и топологоэксергетической структуры связи.

Кодовая диаграмма позволяет представить процесс охлаждения парогазовой смеси и контактный аппарат в виде отдельных взаимодействующих подсистем, показать каналы их взаимодействия и обозначить диссипативные процессы, протекающие в тепломаассообменном аппарате.

Охлаждающая вода 8 (рис. 1), температура и массовый расход которой соответственно $t_{ж1}$ и L_1 , поступает в ороситель аппарата 5, а затем на сетчатую насадку 4. Парогазовая смесь с начальной температурой t_1 и влажностью w_1 движется противотоком через входное отверстие 1, колпач-

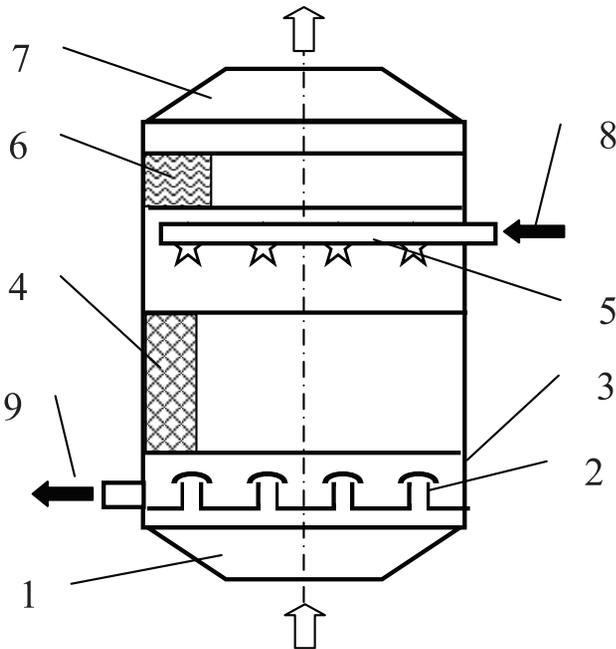


Рис. 1. Контактный конденсатор:

- 1 – вход парогазовой смеси;
 2 – колпачковый подвод со сборником конденсата;
 3 – корпус; 4 – сетчатая насадка;
 5 – ороситель; 6 – жалюзийный сепаратор;
 7 – выход смеси; 8 – охлаждающая вода;
 9 – отвод конденсата.

ковый подвод 2 и насадку 4. Вода нагревается от температуры $t_{ж1}$ до температуры $t_{ж2}$ и выводится из сборника конденсата 2. Парогазовая смесь охлаждается от температуры t_1 до температуры t_2 и выводится из конденсатора через выходное отверстие 7. В процессе охлаждения происходит конденсация водяного пара из парогазовой смеси и диффузия конденсата в среду охлаждающей воды, при этом влагосодержание парогазовой смеси уменьшается от w_1 до w_2 .

В сетчатых секциях утилизационного аппарата происходит конвективный теплообмен и изотермический массообмен между парогазовой смесью и водой, что приводит к потерям эксергии. При движении парогазовой смеси и охлаждающей воды в аппарате возникают потери эксергии за счет гидравлических сопротивлений: на входе и выходе аппарата, в колпачковом подводе, насадке и жалюзийном сепараторе. Кроме того, имеются потери эксергии в окружающую среду с поверхности аппарата.

Кодовая диаграмма аппарата приведена на рис. 2, где приняты следующие обозначения: $R_{Г1}$, $R_{Г2}$, $R_{Г3}$, $R_{ЖС}$, $R_{Г}$, $R_{ГЖ1}$, $R_{ГЖ2}$, $R_{ГЖ3}$, – дисси-

паторы, отражающие потери эксергии на преодоление гидравлического сопротивления, соответственно, парогазовой смеси на входе в конденсатор, подвода, на выходе из конденсатора, жалюзийного сепаратора, сетчатой насадки конденсатора, трубопровода по ходу воды, оросителя, выхода воды из конденсатора; $R_{ГК}$ – диссипатор, отражающий потери эксергии при гидравлическом соединении потоков; $R_{ТО}$ – диссипатор, отображающий потери эксергии при теплообмене; $R_{МО}$ – диссипатор, отражающий потери эксергии при массообмене; $R_{ОС}$ – диссипатор, отражающий потери эксергии в окружающую среду; E_1 – эксергия потока парогазовой смеси на входе в конденсатор; E_2 – эксергия потока парогазовой смеси на выходе из конденсатора; E_3 – эксергия потока воды на входе в конденсатор; E_4 – эксергия потока воды на выходе из конденсатора; 01 – узел точечного смешения потоков; 10 – узел точечного разделения потоков; 11 – узел точечного разделения мощностей.

На основе кодовой диаграммы построена топологоэксергетическая структура связи (рис. 3), которая характеризует эксергетическую картину гидродинамических и тепломассообменных процессов в контактном аппарате.

В топологоэксергетической структуре связи выполнено распределение причинно-следственных связей, учтены правила знаков для потоков, выбраны обобщенные переменные усилий и потоков. В качестве обобщенного усилия принимается удельная эксергия потока, а в качестве обобщенного потока – массовый расход.

На рис. 3 приняты следующие обозначения: Se_1f_1 , Se_2f_2 – источник и сток эксергетических потоков парогазовой смеси на входе и выходе из аппарата; Se_3f_3 , Se_4f_4 – источник и сток эксергетических потоков охлаждающей воды на входе и выходе из аппарата; e_i – удельная эксергия i -го потока; m_i – массовый расход i -го потока; i – обозначение подсистемы, которая является частью физико-технологической системы; R_i – элементы, которые отображают диссипацию эксергии.

На основе топологоэксергетической структуры связи и в соответствии с основным алгоритмом формирования математической модели [192] получена аналитическая форма уравнений материальных и эксергетических потоков в аппарате, представленная системой уравнений (1):

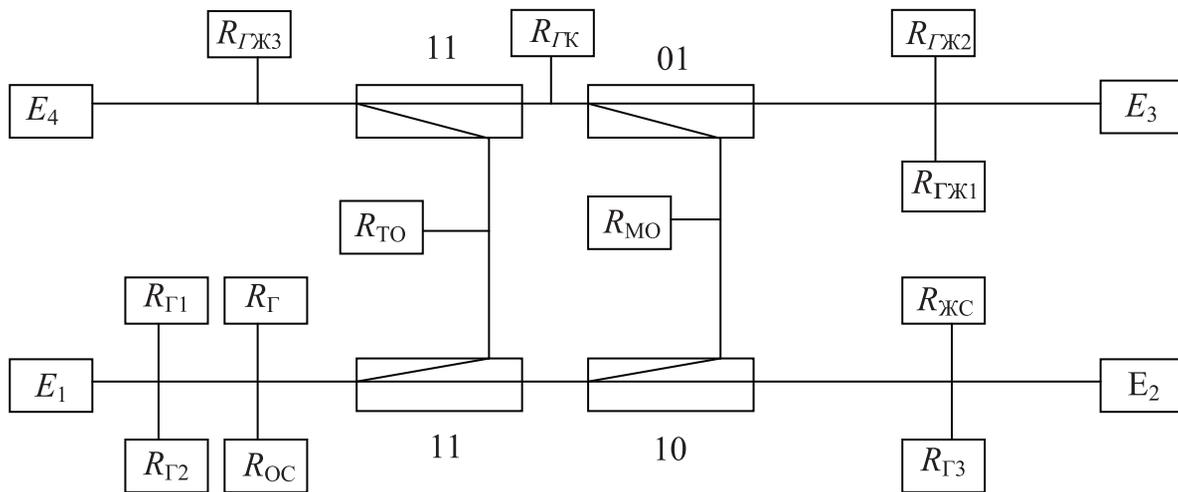


Рис. 2. Кодовая диаграмма контактного теплообменного аппарата.

$$\begin{cases}
 e_1 - R_{Г1}m_2 - R_{Г2}m_3 - e_4 = 0; & m_1 = m_2 = m_3 = m_4; \\
 e_4 - R_{Г}m_5 - R_{ОС}m_6 - e_7 = 0; & m_4 = m_5 = m_6 = m_7; \\
 e_7 - e_8 - e_{13} = 0; & m_7 = m_8 = m_{13}; \\
 e_{13} - R_{ТО}m_{14} - e_{15} = 0; & m_{13} = m_{14} = m_{15}; \\
 e_8m_8 - e_9m_9 - e_{16}m_{16} = 0; & m_8 - m_9 - m_{16} = 0; \\
 e_9 - R_{ЖС}m_{10} - R_{Г3}m_{11} - e_{12} = 0; & m_9 = m_{10} = m_{11} = m_{12}; \\
 e_{16} - R_{МО}m_{17} - e_{18} = 0; & m_{16} = m_{17} = m_{18}; \\
 e_{19} - R_{ГЖ2}m_{20} - R_{ГЖ1}m_{21} - e_{22} = 0; & m_{19} = m_{20} = m_{21} = m_{22}; \\
 e_{22}m_{22} + e_{18}m_{18} - e_{23}m_{23} = 0; & m_{22} + m_{18} - m_{23} = 0; \\
 e_{23} - R_{ГК}m_{24} - e_{25} = 0; & m_{23} = m_{24} = m_{25}; \\
 e_{25}m_{25} + e_{15}m_{15} - e_{26}m_{26} = 0; & m_{25} = m_{26}; \\
 e_{26} - R_{ГЖ3}m_{27} - e_{28} = 0; & m_{26} = m_{27} = m_{28}.
 \end{cases} \quad (1)$$

Найдем аналитическое решение системы (1) в общем виде.

Заданные величины:

m_1, m_{12} – массовые расходы парогазовой смеси на входе и выходе аппарата, кг/с;

$$m_1 = G(1 + w_1), \quad m_{12} = G(1 + w_2);$$

m_{19}, m_{28} – массовые расходы охлаждающей воды на входе и выходе аппарата, кг/с;

$$m_{19} = L_1, \quad m_{28} = L_2 = L_1 + G\Delta w.$$

После решения системы уравнений (1) эксергия охлаждающей воды на выходе из аппарата определяется по уравнению:

$$\begin{aligned}
 e_{28} = & \frac{1}{m_{28}}(e_1m_1 + e_{19}m_{19} - e_{12}m_{12} - m_1^2(R_{Г1} + R_{Г2} + R_{Г} + \\
 & + R_{ОС} + R_{ТО}) - m_{19}^2(R_{ГЖ2} + R_{ГЖ1}) - m_{12}^2(R_{ЖС} + R_{Г3}) - \\
 & - (m_1 - m_{12})^2 R_{МО} - (m_{19} + m_1 - m_{12})^2 R_{ГК} - R_{ГЖ3}m_{28}^2). \quad (2)
 \end{aligned}$$

Эксергия парогазовой смеси на выходе из аппарата

$$\begin{aligned}
 e_{12} = & \frac{1}{m_{12}}(e_1m_1 + e_{19}m_{19} - e_{28}m_{28} - m_1^2(R_{Г1} + R_{Г2} + \\
 & + R_{Г} + R_{ОС} + R_{ТО}) - m_{19}^2(R_{ГЖ2} + R_{ГЖ1}) -
 \end{aligned}$$

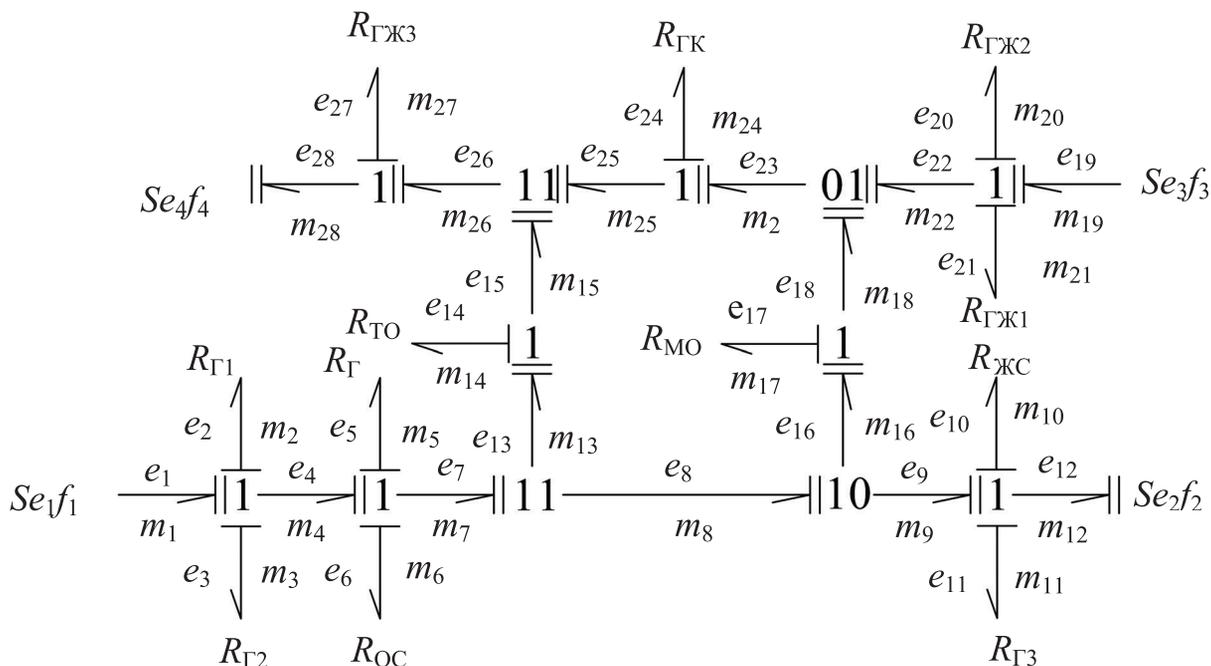


Рис. 3. Топологоэксергетическая структура связи контактного теплообменного аппарата.

$$\begin{aligned}
 & -m_{12}^2(R_{ЖС} + R_{Г3}) - (m_1 - m_{12})^2 R_{МО} - \\
 & - (m_{19} + m_1 - m_{12})^2 R_{ГК} - R_{ГЖ3} m_{28}^2). \tag{3}
 \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned}
 dQ &= dQ_{ТО} + dQ_{МО} \\
 dQ_{ТО} &= \alpha dF_{см} (t_{ПГС} - t_{Ж}) \\
 dQ_{МО} &= r\beta dF_{см} (w_1 - w_2)
 \end{aligned} \right\}, \tag{4}$$

Удельная эксергия на выходе из аппарата зависит от уровня потерь эксергии парогазового потока. Детализация процесса определяется числом диссипаторов эксергетичних потоков, включенных для рассмотрения. Некоторые из них могут быть в процессе анализа исключены как несущественные.

Наиболее сложными и интересными для изучения и моделирования являются процессы, протекающие непосредственно в насадке теплообменного аппарата.

Значения диссипаторов R_i выражают через конструктивно-технологические параметры контактного теплообменного аппарата [1, 7, 10].

В общем виде R_i – элементы для тепловых процессов – определяют по формуле: $R_i = \frac{T_{ОС} \Delta s}{m_i}$.

Рассмотрим аналитические зависимости, характеризующие взаимодействие парогазовой смеси и воды при их встречном движении. Теплота отводится от парогазовой смеси с помощью конвекции и в результате конденсации пара [1, 11]:

где $Q_{ТО}$ и $Q_{МО}$ – тепловые потоки при тепло- и массообмене, $t_{ПГС}$ и $t_{Ж}$ – температура парогазовой смеси и жидкости соответственно.

Учитывая, что толщина водяной пленки бесконечно мала, принимаем одинаковой температуру воды на поверхности и в середине потока. Тогда

$$dQ_{ТО} = \alpha dF_{см} (t_{ПГС} - t_{Ж}). \tag{5}$$

В соответствии с [11] получим следующее выражение:

$$Gdh = \alpha dF_{см} (t_{ПГС} - t_{Ж}) + r\beta dF_{см} (w_1 - w_2). \tag{6}$$

Изменение энтальпии парогазовой смеси

$$dh = \frac{\alpha dF_{см} (t_{ПГС} - t_{Ж}) + r\beta dF_{см} (w_1 - w_2)}{G}. \tag{7}$$

Проинтегрировав выражение для изменения энтальпии парогазовой смеси по высоте канала с учетом неизотермичности охлаждения парогазовой смеси, получим:

$$\Delta h_{ТО} = \frac{\alpha d F_{см} \Delta t_{лог}}{G}, \Delta h_{МО} = \frac{r \beta d F_{см} (w_1 - w_2)}{G}. \quad (8)$$

Исходя из уравнения Гиббса, возрастание энтропии определяется:

$$\Delta s_{ТО} = \frac{\alpha F_{см} \Delta t_{лог}}{G T_{СМ}}, \Delta s_{МО} = \frac{\beta F_{см} \Delta wr}{G T_{Ж}}, \quad (9)$$

где: $T_{СМ}$, $T_{Ж}$ – средние по высоте насадки температуры парогазовой смеси и охлаждающей воды.

Диссипаторы, отображающие потери эксергии при теплообмене и массообмене, будут иметь вид:

$$R_{ТО} = \frac{T_0}{m_1} \frac{\alpha F_{см} \Delta t_{лог}}{G T_{СМ}}, R_{МО} = \frac{T_0}{(m_1 - m_{12})} \frac{\beta F_{см} \Delta wr}{G T_{Ж}}. \quad (10)$$

Зависимости для вычисления других диссипаторов определяем в соответствии с [3, 12].

Для определения термодинамической эффективности контактного тепломассообменного аппарата запишем уравнение эксергетического КПД, а также диссипативный эксергетический коэффициент, отражающий общую долю потерь эксергии в аппарате.

Общий эксергетический КПД аппарата определяется по формуле

$$\eta_{ОБ} = \frac{E_{ВЫХ1} + E_{ВЫХ2}}{E_{ВХ1} + E_{ВХ2}}. \quad (11)$$

Или

$$\eta_{ОБ} = \frac{E_2 + E_4}{E_1 + E_3} = \frac{E_1 + E_3 - \Delta E}{E_1 + E_3} = 1 - \frac{\Delta E}{E_1 + E_3}, \quad (12)$$

где $\Delta E = \sum_{i=1}^n m_i^2 R_i$ – потери эксергии.

Из уравнений (11) и (12) получим выражение для общего эксергетического КПД контактного тепломассообменного аппарата:

$$\eta_{ОБ} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n m_i^2 R_i}{E_1 + E_3} = 1 - \eta_{ДИС}. \quad (13)$$

где $\eta_{ДИС}$ – диссипативный эксергетический коэффициент, определяемый по (14):

$$\eta_{ДИС} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i^2 R_i}{E_1 + E_3}. \quad (14)$$

Для нашего случая $\eta_{ДИС}$ будет иметь вид:

$$\eta_{ДИС} = \frac{(G(1+w_1))^2 (R_{Г1} + R_{Г2} + R_{Г} + R_{ОС} + R_{ТО})}{E_1 + E_3} + \frac{(G\Delta w)^2 R_{МО}}{E_1 + E_3} + \frac{(G(1+w_2))^2 (R_{ЖС} + R_{Г3})}{E_1 + E_3} + \frac{L_1^2 (R_{ГЖ2} + R_{ГЖ1})}{E_1 + E_3} + \frac{(L_1 + G\Delta w)^2 (R_{ГК} + R_{ГЖ3})}{E_1 + E_3}. \quad (15)$$

Выводы

1. На основании топологоэксергетического формализма получена математическая модель, позволяющая провести детальный анализ эксергетических взаимодействий с отражением влияния конструктивно-технологических параметров на эксергетическую эффективность.

2. Полученные зависимости позволяют определить направления дальнейшего повышения эксергетической эффективности контактного аппарата теплоутилизационного контура когенерационной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Эксергетические* расчеты технических систем. Справ. пособие / Бродянский В.М., Верховкер Г.П., Карчев Я.Я. и др. : Под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. АН УССР. – К.: Наукова думка, 1991. – 360 с.

2. Долгополов И.С., Тучин В.Т. Топологоэксергетический метод анализа энергосбережения физико-технологических систем // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, № 24. – С. 116 – 118.

3. 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, – 2002. – Т. 5. – С. 67 – 71 .

4. *Братута Э.Г., Долгополов И.С., Тучин В.Т.* Топологэксергетический подход к оценке энергозатрат в физико–технологических системах // Интегровані технології та енергозбереження. – 2000. – № 4. – С. 20 – 27 .

5. *Долгополов И.С., Тучин В.Т.* Элементная база топологэксергетического метода анализа физико – технологических систем. Часть 1 // Математичне моделювання. – 2005. – № 1. – С. 29 – 36.

6. *Тучин В.Т., Долгополов И.С., Роменская Н.А.* Топологэксергетический подход к моделированию физико-технологических систем, осложненных химическими реакциями // Математичне моделювання. – 2005. – № 2. – С. 18–23.

7. *Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братута Э.Г., Тучина У.Н.* Энергетические аспекты топологэксергетического метода анализа физико – технологических систем – часть 1 // Интегровані технології та енергозбереження. – 2004. – № 4. – С. 81 – 89.

8. *Тучин В.Т., Долгополов И.С., Братута Э.Г., Тучина У.Н.* Энергетические аспекты топологэксергетического метода анализа физико–технологических систем – часть 2 // Интегровані технології та енергозбереження. – 2005. – № 1. – С. 36 – 42.

9. *Сатерленд Дж.* Анализ работы градирен с противоточным движением воздуха и воды и механической тягой // Теплопередача. –1982. – № 3. – С. 129–136.

10. *А.С. Минаева, И.С. Долгополов, В.Т. Тучин* Топологэксергетический анализ сушильной камеры трубы-сушилки (стационарный режим) // Мат.мод. – № 2. – 2004. – С. 55 – 61.

11. *Т. Хоблер* Теплопередача и теплообменники. – Г.: – Госхимиздат, 1961. – 442 с.

12. *Тучин В.Т., Долгополов И.С.* Основы формализма топологэксергетического метода моделирования физико-технологических систем. Сборник научных трудов Днепродзержинского государственного технического университета (технические науки) / Днепродзержинск: ДДТУ. – 2006. – С. 202 – 213.

Получено 07.04.2008 г.