

УДК 510.1:621.1:330.138

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ГРАФОВЫХ ПОСТРОЕНИЙ

Б.Х. Драганов, доктор технических наук

e-mail: nni.elektrik@gmail.com

Приведены основы теоретико-графовых построений. Указан метод оценки энергетической эффективности рекуперативного теплообменного аппарата на основе графовых топологических построений.

Ключевые слова: граф, матрица инциденций, вершина и дуга графа, теплообменный аппарат, эксэргия, эксергетический КПД.

Одна из наиболее актуальных проблем современности заключается в экономии энергетических ресурсов как в промышленных процессах, так и в быту. Непрерывно растущие затраты на производство энергии и связанные с этим глобальные экологические проблемы требуют разработки энергосберегающих технологий, основанных на современных достижениях науки.

Эффективное средство в решении указанной проблемы заключается в оптимизации используемых энергетических структур и их параметров с целью минимизации капитальных и эксплуатационных затрат при соответствующих технических и ресурсных ограничениях.

Цель исследований – разработать метод определения энергетической эффективности теплообменного аппарата.

Материалы и методика исследований. При решении оптимизационных задач удобно пользоваться методом, основанным на теоретико-графовых построениях [1, 2]. Заметим, что теория графов относится к разделу прикладной математики и с ее помощью успешно решаются задачи во многих областях: электротехники, энергетики, транспорта, энергоэкономики и др. Преимущество использования метода теоретико-графовых построений заключается в том, что он удобен при выполнении исследования значительного количества вариантов

и позволяет определить тот, который в наибольшей степени соответствует критерию оптимизации.

Оптимизация любой энергосберегающей системы означает вариации структуры и параметров с целью минимизации капитальных и эксплуатационных затрат при соответствующих технических и ресурсных ограничениях, обеспечение защиты окружающей среды, доступность материалов и создание условий эксплуатационной надежности и невысокой стоимости ремонта.

При исследовании сложных технических систем необходимо выполнить структуризацию объекта как системы взаимосвязанных элементов с учетом собственных им специфических характеристик и процессов, привести перечень анализируемых проблем и возможной динамики развития отдельных элементов системы.

Понятие эксергии как максимальной работоспособности удобно использовать при рассмотрении степени совершенства различных процессов с точки зрения превращения энергии [3, 4].

Любую энергетическую систему можно представить как упорядоченную совокупность физических компонентов, объединенных между собой точками (полюсами) связи. Каждому простому физическому компоненту соответствует некоторая ветвь графа, называемая полюсным графом этого физического компонента.

Для решения задач анализа и синтеза энергосберегающих систем наибольший интерес представляет матрица инциденций.

Пусть имеется орграф $G(V,E)$, состоящий из $v = |V|$ вершин и $e = |E|$ дуг. Матрица инциденций $|S|$ орграфа $G(V,E)$ – это матрица порядка $(v \times e)$, строки которой соответствуют вершинам, а столбцы – ребрам графа с элементами.

Результаты исследований. Изложенный метод используем для оптимизации трубчатого теплообменного аппарата (рис. 1)

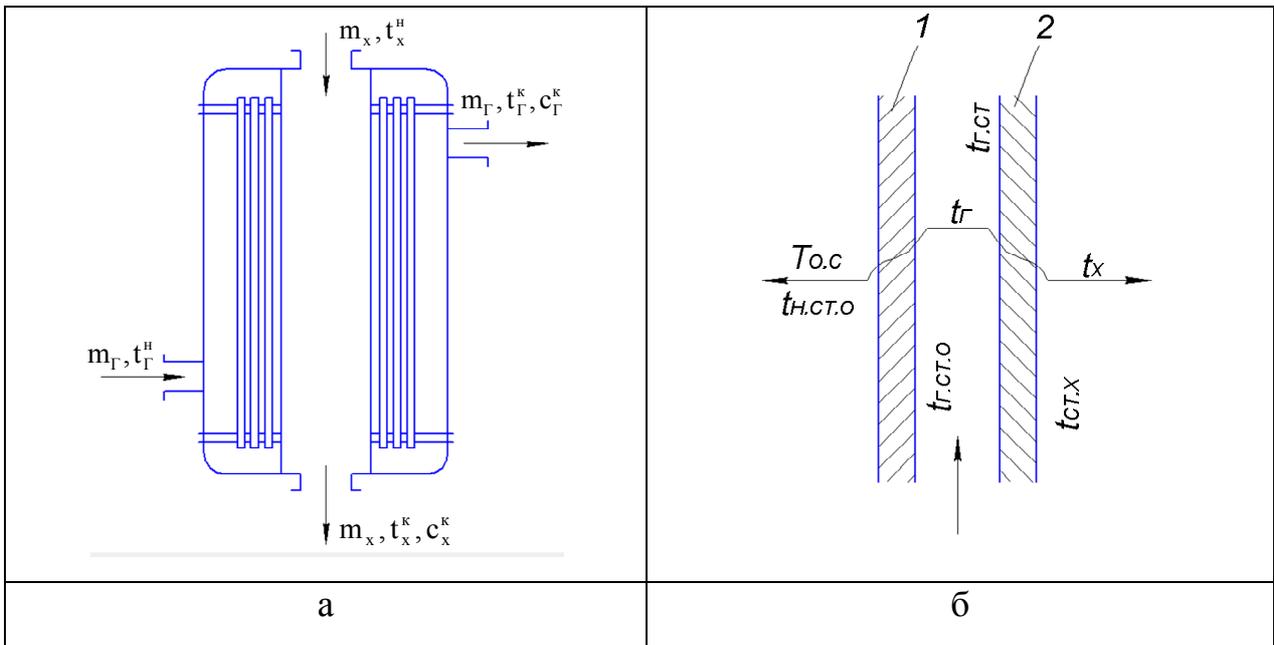


Рис. 1. Кожухотрубный ТА: а – общий вид теплообменника; б – элемент теплообменника с изображением схемы теплообмена

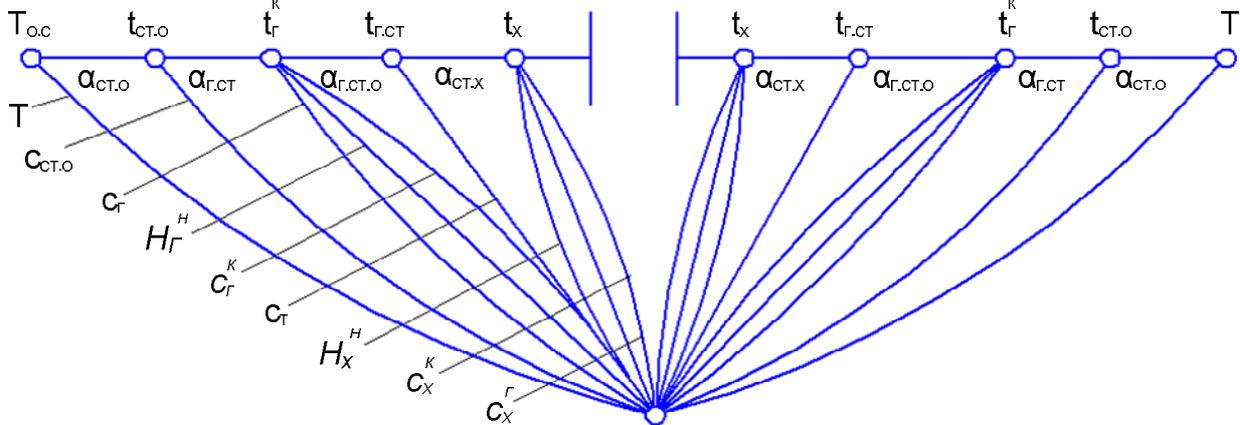


Рис. 2. Структурный граф процесса теплообмена в ТА

Оптимизация изучаемой системы – это определение наилучших из всех возможных вариантов системы относительно выбранного критерия ее эффективности. Комплексная, системная оптимизация имеет целью выбор таких значений параметров системы (технологических, конструктивных и пр.), которые обеспечивали бы оптимальные или близкие к оптимальному значения критерия эффективности

$$Z_{opt} = \underset{x_j \in R^n}{\text{extr}} \{Z(x_j)\}, \quad (1)$$

при ограничениях

$$f_i(x_j) > 0, i = 1, 2, \dots, m; \quad (2)$$

$$q_k(x_j) > 0, k = 1, 2, \dots, L, \quad (3)$$

где R^n – n -мерное действительное векторное пространство.

Нетрудно видеть, что сформулированное условие оптимизации представляет собой многоэкстремальную большемерную задачу дискретного нелинейного программирования, усложненную ограничениями (2) и (3).

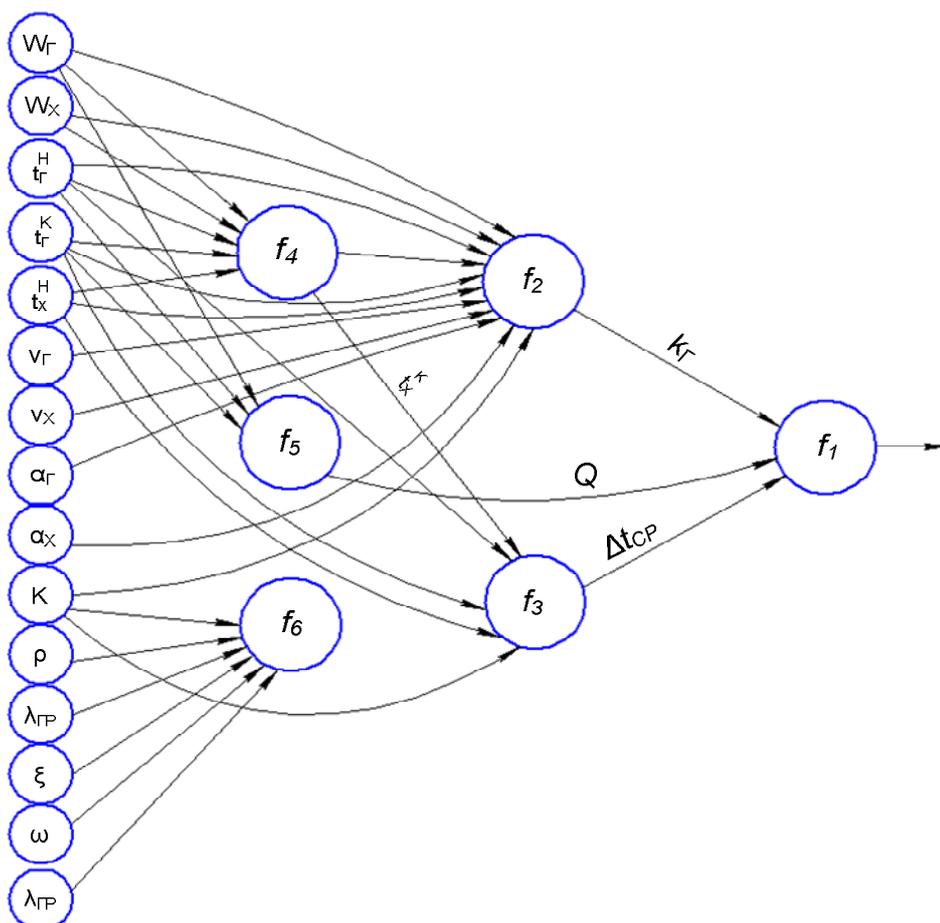


Рис. 3. Информационный граф системы уравнений математической модели ТА

Этот метод, опираясь на хорошо разработанный математический аппарат теории графов, позволяют анализировать и получать оптимальные компоновки системы достаточно просто, не уступая при этом по строгости математического

подхода и общности полученных результатов другим математическим моделям и методам.

Ниже приведен алгоритм эксергетического и термозкономического анализа энергетических систем.

Алгоритм $АП_{\Sigma}$ – определение потерь эксергии в энергетической системе. Алгоритм состоит из следующих основных шагов:

I. Построить соответствующий данной системе эксергетический потоковый граф $E = (A, U)$, матрицу инциденций $\|M_{ij}\|$ и рассчитать эксергии потоков по дугам $E_j, j = 1, 2, \dots, n$.

II. Для всех элементов $i = 1, 2, \dots, m$ определить входящие ($M_{ij} = 1$) и выходящие ($M_{ij} = -1$) потоки, рассчитать суммы E_j^{BX} и E_j^{BYX} потоков эксергии l -х элементов и степени их термодинамического совершенства.

III. Рассчитать суммарные потери эксергии

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m P_i \quad (4)$$

Понятно, что величина E_{Σ}^{BX} представляет собой сумму таких потоков E_j , которым в матрице инциденций отвечают столбцы, не содержащие -1 , т.е. эти потоки не выходят ни из одного элемента рассматриваемой системы, а являются только входящими для нее или столбец содержит только $+1$ [6].

В основу анализа теплообменных систем следует положить математическую модель протекающих в них физических процессов. Это позволяет связать характеристики входных параметров теплообменного аппарата (например, значения температуры входного технологического потока) с параметрами выходного потока и характеристиками состояния теплообменников с учетом технологических связей между ними.

Рассмотрим кожухотрубный, одноходовой теплообменник с коридорным расположением труб (рис. 1). Приведенные ниже положения в принципе применимы для теплообменников с шахтным расположением труб, а также для

пластинчатых теплообменников. Указанные на схеме параметры процесса в дальнейшем повторяются. Структурный граф процесса теплообмена представлен на рис. 2.

Применим такие обозначения: m_{Γ} , m_{χ} – массовые расходы горячего и холодного потоков; t_{Γ}^H , t_{χ}^H – начальные температуры горячего и холодного потоков; t_{Γ}^K , t_{χ}^K – конечные температуры горячего и холодного потоков; $T_{o.c.}$ – температура окружающей среды; c_{Γ}^K , c_{χ}^K – удельные теплоемкости горячего и холодного потоков на выходе из ТА; $t_{н.ст.о}$ – температура наружной поверхности стенки со стороны окружающего воздуха; $t_{\Gamma.ст.}$ – температура поверхности трубы со стороны горячего потока; $a_{\Gamma.ст.}$ – коэффициент теплообмена между горячим потоком и внутренней поверхностью кожуха; $a_{ст.т}$ – коэффициент теплообмена между внутренней стенкой трубы и холодным потоком; $a_{\Gamma.ст.о}$ – коэффициент теплообмена между горячим потоком и внешней стеной трубы; $a_{ст.о}$ – коэффициент теплообмена между внешней стенкой и внешней окружающей средой; $c_{ст.о}$ – теплоемкость внешней стенки (кожуха); c_{Γ}^K – теплоемкость горячего потока на выходе из аппарата; c_{χ}^K – теплоемкость холодного потока на выходе; c_{Γ} , c_{χ} – теплоемкость горячего и холодного потоков на входе; H_{Γ}^H , H_{χ}^H – энтальпии горячего и холодного потоков на входе в ТА.

Отметим, что значения T_0 и H_0 , относящиеся к окружающей среде, считаются известными.

В структурном графе процесса теплообмена узловая точка О соответствует базовой точке измерения температуры (0°C). Прежде чем представить полюсные уравнения в матричной форме, изложим исходные предпосылки.

В теплообменнике в каждом ряду имеется i труб; количество рядов j . Примем, что по мере перемещения горячего потока от входного к выходному

сечению коэффициенты теплообмена со стороны наружной поверхности труб $a_{г.ст.о}$ и стороны внутренней поверхности труб $a_{ст.т}$ не изменяются. В тех случаях, когда в процессе теплообмена имеет место изменение агрегатного состояния одного из потоков, также принимается, что коэффициенты теплообмена $a_{г.ст.о}$ и $a_{ст.т}$ имеют постоянное значение во всем объеме теплообменника. Их можно обозначить и $a_{г.ст.о}^{\text{эф}}$ и $a_{ст.т}^{\text{эф}}$. Они обеспечивают те же условия теплообмена, что и их переменные значения.

Кроме того, не будем учитывать термическое сопротивление стенки трубы вследствие его малого значения по сравнению с термическим сопротивлением со стороны процессов конвективного теплообмена.

Для эксергетической оценки теплообменного аппарата определим его эксергетический КПД:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{\text{вых}}}{E_{\text{вх}}} = \frac{E_{\text{вх}} - E_{\text{п}}}{E_{\text{вх}}}, \quad (5)$$

где $E_{\text{вх}}$ – подведенная к теплообменнику эксергия; $E_{\text{вых}}$ – эксергия, отведенная от ТА; $E_{\text{п}}$ – потери эксергии в аппарате.

Потери эксергии в теплообменном аппарате обусловлены необратимым теплообменом из-за конечной разности температур $E_{\text{т}}$; гидравлическим сопротивлением при течении теплоносителей E_{ρ} , потерями теплоты в окружающую среду $E_{\text{с}}$, т. е. $E_{\text{п}} = E_{\text{т}} + E_{\rho} + E_{\text{с}}$.

Примем индекс "о" для охлаждаемого потока теплоносителя и индекс "н" для нагреваемого потока.

Общие потери эксергии при теплообмене из-за конечной разности температур между теплоносителями

$$E_{\text{т}} = E_q^o - E_q^h = Q\Delta\bar{\tau}_e, \quad (6)$$

где E_q^o, E_q^h – эксергии соответствующих потоков; Q – тепловая нагрузка теплообменника; $\Delta\bar{\tau}_e$ – средняя разность эксергетических температурных функций потоков "о" и "н" при охлаждении первого потока и нагреве второго.

Эксергетическая температурная функция

$$\bar{\tau}_e = 1 - T_{o.c} / T;$$

$$E_q^H = \Delta \bar{\tau}_e. \quad (7)$$

Потери эксергии от конечной разности температур при теплообмене будут равны

$$E_T = Q[(1 - T_{o.c} / T_H) - (1 - T_{o.c} / T_o)] = QT_{o.c}((T_H - T_o) / T_H T_o). \quad (8)$$

Пользуясь понятием водяного эквивалента $W = m_r c_r \approx m_x c_x$, получим

$$E_T = T_{o.c} W \ln \frac{T_x^K T_\Gamma^K}{T_x^H T_\Gamma^H}. \quad (9)$$

Эксергетический КТД теплообмена ($E_p = E_{o.c} = 0$):

$$\eta_{ex} = E_q^o / E_q^H = Q\tau_e^o / Q\tau_e^H = \tau_e^o / \tau_e^H = \Delta E_{o.c} / \Delta E_H, \quad (10)$$

где $\Delta E_o, \Delta E_H$ – изменение эксергии охлаждаемого и нагреваемого потоков.

Потери эксергии от гидравлического сопротивления в ТА определяются соотношением:

$$E_p = T_{o.c} R \ln \frac{p_{\text{ВЫХ}} + \Delta p}{p_{\text{ВЫХ}}}, \quad (11)$$

где $\Delta p = p_{\text{ВХ}} - p_{\text{ВЫХ}}$ – падение давления в системе.

При $\Delta p / p_{\text{ВЫХ}} \ll 1$ потеря эксергии от гидравлического сопротивления

$$E_p = mRT_{o.c} \Delta p / p_{\text{ВЫХ}}. \quad (12)$$

Потери эксергии от теплообмена с окружающей средой

$$E_s = Q\Delta \bar{\tau}_e = E_{qo.c}^o + E_{qo.c}^H = m_H Q_H \left[1 - \frac{T_{o.c}}{T_{H.o}} \right] + m_o Q_o \left[1 - \frac{T_{o.c}}{T_{o.o}} \right], \quad (13)$$

где $T_{H.o}$ – средняя температура наружной поверхности ТА со стороны H ; $T_{o.c}$ – средняя температура наружной поверхности ТА со стороны охлажденного потока.

Потери эксергии от теплообмена с окружающей средой E_s могут быть определены с использованием значений энтальпии потоков

$$E_s = m_H c_H (t_{H.o} - t_{o.c}) + m_o c_o (t_{o.o} - t_{o.c}), \quad (14)$$

где c_H и c_o – теплоемкости соответствующих потоков.

В результате можно записать выражение для эксергетического КПД теплообменного аппарата:

$$\eta_{ex} = \frac{E_{BX} - E_T - E_p - E_s}{E_{BX}} =$$

$$= 1 - \frac{T_{o.c} \left[m_r R_\Gamma \frac{\Delta p_\Gamma}{p_{\Gamma.BYX}} + m_x R_x \frac{\Delta p_x}{p_{x.B.B}} + m_r c_\Gamma \ln \frac{T_\Gamma^K}{T_\Gamma^H} + m_x c_x \ln \frac{T_x^K}{T_x^H} \right] - Q \Delta \bar{\tau}_{es}}{Q \frac{T_\Gamma^H - T_{o.c}}{T_\Gamma^H}}, \quad (15)$$

где $\Delta \bar{\tau}_{es}$ – средняя эксергетическая температура изоляции ТА.

С изменением структуры установки или значения исходных параметров определяют оптимальный вариант по энергетическим показателям.

Выводы

Оптимизация любой энергетической системы означает поиск схемного решения (в первую очередь, модификацию структуры) и соответствующих параметров с целью минимизации энергозатрат с учетом существующих ограничений и требований в области использования энергии (защита окружающей среды, безотказность и стабильность действий, надежность управления режимом работы в процессе эксплуатации).

Эксергетическая система имеет определенную технологическую структуру, т.е. состоит из ряда взаимосвязанных элементов, характеризуется заданными параметрами, взаимодействует с окружающей средой.

Метод теоретико-графовых построений имеет то преимущество, что исследуемые структуры представлены в наглядной форме и удобно выбрать возможные варианты решения. Разработаны алгоритмы решения подобных задач.

Список литературы

1. Харари Ф. Теория графов / Харари Ф. – М.: Мир, 1973. – 300 с.
2. Драганов Б.Х. Оптимизация методами теории графов систем теплоснабжения с использованием возобновляемых источников энергии /

Б.Х. Драганов, Т.В. Гулко // Вестн. Челябин. агроинж. ун-та. – 2000. – Вып.31. – С. 62–66.

3. Эксергетические расчеты технических систем. Справ. пос.: под ред. А.А. Долинского, В.М. Бродянского. – К.: Наук. думка, 1991. – 360 с.

4. Кафаров В. Анализ и синтез химико-технологических систем / Кафаров В., Мешалкин В.. – М.: Химия, 1991.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ГРАФОВИХ ПОБУДОВ

Б.Х. Драганов

Наведено основи теоретико-графових побудов. Наведено метод оцінки енергетичної ефективності рекуперативного теплообмінного апарата на основі графових топологічних побудов.

Ключові слова: граф, матриця інцидентій, вершина й дуга графа, теплообмінний апарат, ексергія, ексергічний ККД.

ANALYSIS OF POWER SYSTEMS EFFICIENCY BY GRAPH BUILT

B. Draganov

Given the basics of graph-theoretic constructions. Set the method of assessing the energy efficiency of regenerative heat exchanger based on graph topological constructions.

Keywords: graph, incidence matrix, the top and the arc of the graph, the heat exchanger, exergy, eksergetichesky efficiency.