

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВ ПОВЫШЕННОЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

Пастушенко С. И., акад. МААО, д.т.н., проф.

Черноморский государственный университет имени Петра Могилы

Пастушенко А. С., к.т.н.

Николаевский национальный аграрный университет

г. Николаев, Украина

Тел. (0512) 76-92-73

e-mail: pastushenko_s@ksau.kherson.ua

Аннотация. Предложена методика оптимизации теплообменных устройств по минимуму приведенных затрат с учётом энергозатрат и эксплуатационных расходов в денежном выражении. Особенностью методики в том, что она создана на базе математической модели теплообменного устройства, представленной в метрической форме. Это позволило использовать двудольный информационный граф, что послужило теоретической основой построения вычислительных процедур по оптимизации выбора теплообменных устройств.

Ключевые слова: энергоэффективность, теплообменный аппарат, оптимизационная задача, теория графов.

Постановка проблемы. Все основные сельскохозяйственные процессы механизированы, поэтому уровень технологий в различных отраслях производства, а следовательно качество и себестоимость получаемой продукции во многом определяется степенью совершенства используемых машин.

Одними из основных структурных элементов сельскохозяйственной техники, удельный вес энергетических процессов в которых наибольший, являются теплообменные аппараты разнообразных конструкций. Они обеспечивают многие технологические процессы путем передачи теплоты от среды с высокой температурой к среде с более низкой температурой, и используются в тракторах, автомобилях, самоходных сельскохозяйственных машинах различного назначения, в калориферах, теплогенераторах, сушильных агрегатах и т. п.

Оказать существенную помощь в решении одной из значимых проблем современности, которой является обеспечение энергосбережения, призваны новые энергосберегающие методики анализа, синтеза и оптимизации. Они позволяют на начальном этапе создания объекта, формировать структурные и функциональные элементы сельскохозяйственной техники как энергоэффективные энергетические системы, что может быть реализовано, в том числе и в отношении теплообменных устройств.

Анализ последних исследований и публикаций. Одно из основных требований, предъявляемых к теплообменным аппаратам, заключается в том, что при заданной тепловой нагрузке и других равных исходных параметрах рабочих сред аппарат должен иметь наименьшие габаритные размеры и наименьшую материалоемкость. Это достигается интенсификацией процесса теплообмена за счет турбулизации потока и организации, по возможности, по всей поверхности теплоотдачи развитого вихревого течения.

Реализация такого вектора энергосбережения при передаче и трансформации тепловых потоков может происходить за счет применения тепловых труб, которые

характеризуются рядом преимуществ: низким термическим сопротивлением, не требуют дополнительных затрат энергии на передачу теплоносителя [1].

Теплообменники с замкнутым испарительно-конденсационным циклом в последнее время все шире используются в различных отраслях техники. В монографии [2] приведены сведения об использовании термосифонов системы регенеративного обогрева помещений. При этом используется отбросная теплота вентиляционного воздуха. Подобные системы позволяют утилизировать до 70 % выбрасываемой теплоты.

Для экономии топлива и снижения токсичности выхлопных газов фирмой «Даймлер-Бенс» используется теплота отходящих газов двигателя для интенсификации нагрева антифриза в системе охлаждения в период пуска или при малых оборотах двигателя [3]. Для этого в систему охлаждения устанавливают дополнительный теплообменник с термосифонами.

В Украине разрабатываются различные типы термосифонных утилизаторов теплоты [4] для работы в системах приточно-вытяжной вентиляции при температурах выбрасываемого воздуха 25...80 °С.

Надо признать, что невзирая на ряд существенных преимуществ, тепловые трубы в качестве теплообменных аппаратов не нашли должного применения в сельскохозяйственной технике. Несомненно, что технико-экономически обоснованное использование тепловых труб в системе энергоснабжения сельского хозяйства окажется весьма эффективным.

Методам расчета и выбора оптимальных параметров аппаратов на тепловых трубах посвящен ряд работ, среди которых выделяются [5–10].

Заслуживает внимания методика теплотехнического расчета теплообменников на тепловых трубах, изложенная в работе [11].

Цель исследования. Получить алгоритм решения оптимизационной задачи, направленной на повышение эффективности теплообменного устройства, на примере кожухотрубного теплообменника.

Основная часть. Назначение энергосбережения как процесса управления технической системой заключается в повышении эффективности использования энергии. Понятие «повышение эффективности использования энергии» является комплексным и может быть выражено в параметрах, позволяющих обобщить влияния всех основных факторов. В качестве такого параметра в работе принято количество передаваемой энергии во всех узлах системы.

Исследования, проводимые в последнее время и направленные на интенсификацию процесса конвективного теплообмена и создание наиболее совершенного теплообменного оборудования, как по условиям теплопередачи, так и габаритно-объемным показателям, способствовали усовершенствованию конструкций теплообменных устройств. В связи с этим задача оптимизации теплообменных устройств по заранее принятой целевой функции весьма существенна.

Из большого разнообразия теплообменников в сельскохозяйственном производстве наибольшее распространение получили рекуперативные кожухотрубные устройства. Рассмотрим оптимизационную задачу на их примере. Схема такого теплообменного устройства приведена на рис. 1.

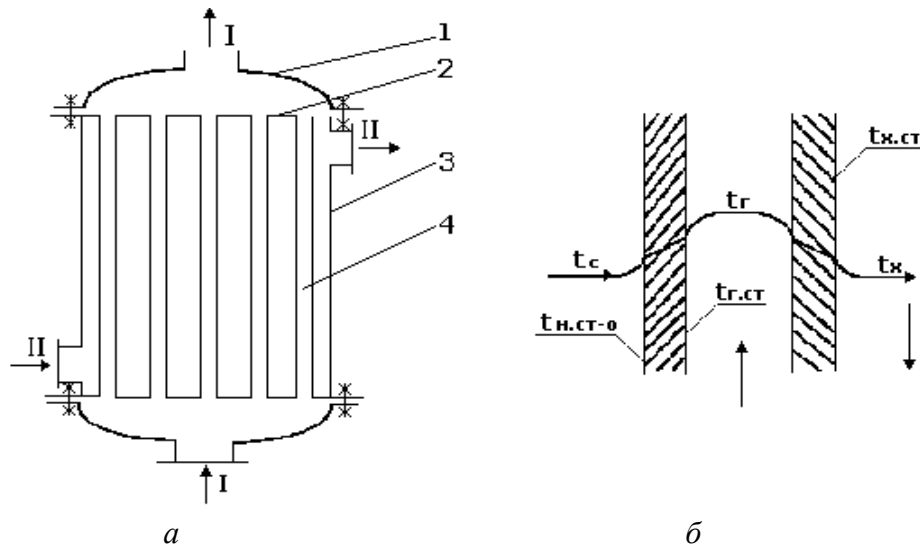


Рисунок 1 - Схема кожухотрубного теплообменника (а) и его расчетная схема (б): I, II – теплоносители; 1 – крышка; 2 – трубная доска; 3 – кожух; 4 – труба

Кроме того, примем допущение, что можно пренебречь термическим сопротивлением стенки труб вследствие его малого значения по сравнению с термическим сопротивлением конвективного теплообмена.

Математическую модель технической системы запишем в виде функциональной зависимости

$$\bar{Y} = F(\bar{K}, \bar{D}, T, \bar{U}, \bar{V}), \quad (1)$$

где \bar{Y} – вектор выходных параметров; F – вектор-функция; \bar{X} – вектор входных параметров потока; \bar{K} – вектор конструктивных параметров; \bar{D} – вектор заданных или определяемых технологических параметров; T – заданная структура технологической топологии (технических связей); \bar{U} – вектор режимных (регулирующих) характеристик; \bar{V} – вектор параметров окружающей среды. Критерий оптимизации определяется зависимостью:

$$\psi = \varphi(\bar{K}, \bar{D}, T, \bar{U}, \bar{V}). \quad (2)$$

Конструктивными параметрами K являются поверхность теплообмена F , диаметр кожуха d_k и труб $d_{тр}$ теплообменника, длина труб l , площади проходных сечений труб $S_{тр}$ и межтрубного пространства S_m , количество ходов в трубном пространстве.

К технологическим параметрам D относятся линейные скорости потоков в трубном $w_{тр}$ и межтрубном w_m пространствах, коэффициенты теплоотдачи α и теплопередачи k , разность температур Δt , тепловая нагрузка Q теплообменного устройства.

Структура технологической T топологии включает связь между элементами теплообменной системы (отдельных теплообменников, входящих в сложную систему, насоса и пр.).

К режимным характеристикам U относятся тепловые нагрузки Q теплообменника, расход теплоносителей M_r и M_x , разность температур на входе и выходе теплоносителя.

Параметрами окружающей среды V являются: температура $T_{о.с}$, давление $p_{о.с}$ и относительная влажность $\phi_{о.с}$ окружающего воздуха.

Математическую модель теплообменного устройства представим системой уравнений

f_4	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
f_5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
f_6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
f_7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1

Рисунок 2 - Двудольный информационный граф и матрица инцидентий для теплообменного устройства, изображенного на рис. 1.

На рис. 1 и в формулах (3) – (9) приняты обозначения: Q – тепловая нагрузка теплообменника; k – коэффициент теплопередачи; F – поверхность теплообмена; Δt_{cp} – средняя разность температур; t^h, t^k – начальная и конечная температуры потоков; w – скорость движения потока; ν – кинематический коэффициент вязкости; $\lambda_{ст.к}$ – теплопроводность стенки кожуха; α – коэффициент теплообмена; a – коэффициент температуропроводности; M – массовый расход потока; c – теплоемкость потока; ρ – плотность; $d_{вн}$ – внутренний диаметр труб; Δp – падение давления; $\lambda_{тр}$ – коэффициент трения; l – длина труб; ξ – коэффициент местных потерь; $f(K)$ – функция конструкции теплообменника. Индексы “г” и “х” относятся соответственно к горячему и холодному потокам, а “н” и “к” – к начальным и конечным значениям соответствующих параметров. Кроме того, примем следующие обозначения: $t_{н.ст.-о}$ – температура наружной поверхности стенки со стороны окружающего воздуха; t_k – температура внутренней поверхности кожуха; $t_{г.ст.-о}$ – температура поверхности трубы со стороны горячего потока; $t_{х.ст}$ – температура поверхности трубы со стороны подогреваемого потока; $\alpha_{ст.-о}$ – коэффициент теплообмена между внешней стенкой и внешней окружающей средой; $\alpha_{г.ст}$ – коэффициент теплообмена между горячим потоком и внутренней поверхностью кожуха; $\alpha_{г.ст.-о}$ – коэффициент теплообмена между горячим потоком и внешней стенкой трубы; $\alpha_{ст.х}$ – коэффициент теплообмена между стенкой трубы и холодным потоком.

Приведенную систему уравнений представим в матричной форме [12]. Эта матрица удобна для выполнения расчетов и выбора наиболее эффективного теплообменника в энергетическом отношении. Путем анализа нескольких вариантов такого теплообменного устройства, отличных по топологическим и технологическим характеристикам, можно определить оптимальное решение.

Для оптимизации технических, в том числе энергетических, систем следует использовать возможности теории графов [13].

Пользуясь системой уравнений (3) – (9), построим двудольный граф и матрицу инцидентий (рис. 2).

Двудольный информационный граф в сочетании с матрицей является теоретической основой построения вычислительных процедур по оптимизации выбора теплообменных устройств.

Конструкция теплообменного аппарата поверхностного типа отражается вектором [12]

$$\overline{K}_{ТУ}^F = \{d_n, d_{вн}, F_n, F_{вн}, d_p, \delta_p, S_p, S_1, S_2, l_T, n_{ход}, Z\}, \quad (10)$$

где приняты обозначения: d_p, δ_p – диаметр и толщина оребрения; S_p – шаг расположения оребрения; S_1, S_2 – шаги между трубами в продольном и поперечном сечении; $n_{ход}$ – число ходов в межтрубном пространстве; Z – приведенные затраты.

Энергетическое совершенство теплообменного устройства определяют его эксергетическим КПД.

В качестве критерия эффективности теплообменного устройства может быть выбран технико-экономический критерий, а именно приведенные эксплуатационные затраты [14].

В данном случае нам представляется, что более обоснованным критерием эффективности являются приведенные затраты, определяемые по расходуемой на процесс энергии [15].

Оптимизацию теплообменного устройства наиболее целесообразно основывать на методе теории графов. Постановка задачи оптимального выбора значений температур и их напоров, а также топологии теплообменного устройства может быть сформулирована на принципах задачи о кратчайшем пути точек сочленения в графе. Суть решения следующая.

Дан граф, где $A = \{a_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, – множество его вершин, соответствующих некоторым значениям температурных напоров. Задача заключается в нахождении кратчайшего пути, т.е. минимума суммарного веса дуг, входящих в граф. Иными словами – необходимо минимизировать функцию

$$Z = \sum_i \sum_j Z_{ij} a_{ij} \quad (11)$$

для всех $i, j \in$ сети, $i \in A; j \in A; i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 0, 1, 2, \dots, n$ – номера вершин; Z_{ij} – вес дуги i, j , т.е. приведенные затраты на эксплуатацию теплообменника (или затраты на затраченную энергию).

Для каждого элемента приведенные затраты

$$Z = C_{\text{э}} \Pi_{\text{ex}} + E_{\text{н}} K_F, \quad (12)$$

где $C_{\text{э}}$ – стоимость единицы эксергии (по тарифам на электроэнергию); Π_{ex} – потери эксергии в данном элементе теплообменника (или в теплообменнике в целом); $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент окупаемости капитальных вложений; K_F – капитальные затраты на теплообменное устройство.

Значения a_{ij} должны удовлетворять условию:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если дуга } i, j \text{ входит в рассматриваемый путь;} \\ 0 & \text{– в противном случае.} \end{cases}$$

Граничные условия формулируются следующим образом:

$$\sum_j A_{kj} - \sum_j A_{ki} = \begin{cases} 1, & k = S \text{ (фиктивный источник);} \\ 0 & \text{для всех остальных } k; \\ -1 & \text{для } k = m \text{ (фиктивный сток).} \end{cases}$$

Эта задача является комбинаторной задачей целочисленного дискретного программирования с булевыми переменными.

Множество вершин $A = \{a_i\}$ представляет собой множество температурных напоров ΔT_i , $i = 0, 1, 2, \dots, n$, по ходу теплоносителей. Эти напоры формулируются проектировщиком априори эвристически. В фиктивных вершинах нет разности температур, так как им не соответствует реальный элемент, параметр или процесс. Полученные значения Z_{ij} формируют матрицу весов, а соответствующие им F_{ij} – массив данных по поверхностям и дугам.

По этим данным из имеющейся базы данных на теплообменное оборудование выбираются соответствующие теплообменные устройства и их стоимость (или стоимость затраченной энергии в процессе теплообмена).

Выводы. Разработанная методика оптимизации теплообменных устройств позволяет получить оптимальные конструктивные и температурные параметры и оценить их эффективность с использованием минимума приведенных затрат.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев Л.Л. Теплообменники на тепловых трубах / Л.Л. Васильев. – Минск : Наука и техника, 1981. – 143 с.
2. Дан П.Д. Тепловые трубы: Пер с англ. / П.Д. Дан, Д.А. Рей. – М. : Энергия, 1979. – 272 с.
3. Wolf-Dietrich M. Heat pipe for heat recovery from exhaust gas of a diesel engine in a passenger car // Prepr. 6 th Int. heat pipe Conf. (Grenoble, May 1987). – Grenoble, 1987. – P.586–589.
4. Термосифонный утилизатор теплоты вытяжного воздуха / А.Р. Ферт, Н.И. Чеховская, А.В. Гребенюк [и др.] // Водоснабжение и санитарная техника. – 1987. – № 6. – С. 20–21.
5. Пиоро И.Л. Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами / И.Л. Пиоро, В.А. Антоненко, Л.С. Пиоро. – Киев : Наукова думка, 1997. – 248 с.
6. Косой Б.В. Экологические аспекты применения теплообменников на тепловых трубах // Тез. докл. IV-го Межд. конф. по экологии “Экология, продукты питания, здоровье”, (3–5 октября, 1995). –Одесса. –1995 г., – С. 14.
7. Смирнов Г.Ф. Теплотехнические расчеты теплообменных аппаратов на тепловых трубах и термосифонах / Г.Ф. Смирнов, О.К. Бирюков, Б.В. Косой // Теплоэнергетика. –1993. –№ 1. –С. 68–70.
8. Смирнов Г.Ф. Элементы оптимизации теплообменных аппаратов с тепловыми трубами и термосифонами / Г.Ф. Смирнов, О.К. Бирюков, Б.В. Косой // Теплоэнергетика. –1993. –№ 10. –С. 58–61.
9. Семена М.Г. Тепловые трубы с металловолоконистыми капиллярными структурами / М.Г. Семена и др. –Киев: Вища школа, 1984. – 214 с.
10. Чи С. Тепловые трубы: теория и практика / С. Чи. – М. : Мир. 1981. – 207 с.
11. Косой Б.В. Теплофизические модели рационального проектирования теплообменных аппаратов на тепловых трубах. Автореф. дис. канд. техн. наук. / Б.В. Косой – Одесса. –1996. – 16 с.
12. Кафаров В.В. Метод построения двудольного графа для формализации задачи синтеза теплообменных систем как задачи оптимального назначения / В.В. Кафаров, В.П. Мешалкин, Л.В. Гурьева // Доклады АН СССР. –1979. –Т. 247. № 1. –С. 165–169.
13. Харари Ф. Теория графов / Ф. Харари. – М. : Мир. 1973. – 300 с.
14. Каневец Г.Е. Обобщенные методы расчета теплообменников / Г.Е. Каневец. –К. : Наук. думка. 1979. – 351 с.
15. Nitsch R. Zur Theorie der thermodynamischen und energiewirtschaftlichen Bewertung von Energieumwandlungsverfahren // Wissenschaftliche Zeitschrift, –1965. Bd. 7. –№ 2. –S. 88–99.

BIBLIOGRAPHY

1. Vasil'iev L.L. Heat exchangers on heat pipes/ L.L. Vasil'iev. –Minsk : Nauka i tekhnika, 1981. – 143 s.
2. Dan P.D. Heat pipes / P.D.Dan, D.A.Rey; [Trans. from Eng.]. – М. : Energiya, 1979. – 272 s.
3. Wolf-Dietrich M. Heat pipe for heat recovery from exhaust gas of a diesel engine in a passenger car // Prepr. 6th Int. heat pipe Conf. (Grenoble, May 1987). – Grenoble, 1987. – P.586–589.
4. Fert A.R. Thermosiphon heat utilizer of exhaust air / A.R. Fert, N.I. Chekhovskaya, A.V. Grebenyuk [i dr.] // Vodospabzhenie i sanitarnaya tekhnika. – 1987. – № 6. –s. 20–21.
5. Pioro I.L. Effective heat exchangers with diphase thermosyphons / I.L. Pioro, V.A. Antonenko, L.S. Pioro. – Kiev : Naukova dumka, 1997. – 248 s.
6. Kosoy B.V. Ecological aspects of heat exchangers application on heat pipes// Tez. dokl. IV-go Mezhd. konf. po ekologii “Ekologiya, produkty pitaniya, zdorov'e”, 3–5 October, 1995. –Odessa:1995., – S. 14.

7. Smirnov G.F. Thermotechnical calculation of heat exchangers on on heat pipes and thermosyphons / G.F. Smirnov, O.K. Biriukov, B.V. Kosoy // Teploenergetika. –1993. –№ 1. – S. 68–70.
8. Smirnov G.F. Elementary optimization of heat exchangers with heat pipes and thermosyphons / G.F. Smirnov, O.K. Biriukov, B.V. Kosoy // Teploenergetika. –1993. –№ 10. – S. 58-61.
9. Semena M.G. Heat pipes with metal-fibrous capillary structures / M.G. Semena [i dr.] –Kiev: Vyshcha shkola, 1984. – 214 s.
10. Chi S. Heat pipes: theory and practice / S. Chi. – M.: Mir. 1981. – 207 s.
11. Kosoy B.V. Thermophysical models of heat exchangers intelligent design on heat pipes. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. / B.V. Kosoy. – Odessa,1996. – 16 s.
12. Kafarov V.V. Bipartite graph building technique for formalization of heat-exchange system synthesis task as a optimal assignment task / V.V. Kafarov, V.P.Meshalkin, L.V. Gur'eva // Doklady AN SSSR. –1979. –T. 247. № 1. –S. 165–169.
13. Kharari F. Graph theory / F.Kharari. – M. : Mir. 1973. – 300 s.
14. Kanevets G.E. Detached calculation method of heat exchangers / G.E. Kanevets. –K. : Nauk. dumka. 1979. – 351 s.
15. Nitsch R. Zur Theorie der thermodynamischen und energiewirtschaftlichen Bewertung von Energieum wandlungs verfahren // Wissenschaftliche Zeitschrift, –1965. Bd. 7. –№ 2. –S. 88–99.

OPTIMIZATION METHOD OF HIGH ENERGY EFFICIENCY HEAT EXCHANGERS

S. I. Pastushenko, A. S. Pastushenko

Summary

Optimization method of heat exchangers under minimum of present expenses subject to power inputs or operating costs in terms of money has been suggested. The method has been developed on the basis of mathematical model of heat exchanger overrepresented metric form. This made it possible to apply bipartite information graph as a theoretical base for construction of computing procedures on option optimization of heat exchangers.

Key words: power-efficiency, heat exchanger, optimization problem, theory of graphs.