

Анатычук Л.И., Кузь Р.В., Прибыла А.В.

Институт термоэлектричества НАН и МОН молодежи спорта Украины,
ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина;
Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича,
ул. Коцюбинского, 2, Черновцы, 58012, Украина

О ВЛИЯНИИ СИСТЕМЫ ТЕПЛООБМЕНА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНДИЦИОНЕРА

Приводятся результаты расчета эффективности термоэлектрического кондиционера с учетом влияния системы теплообмена. Определены оптимальные режимы работы системы теплообмена для достижения максимальной эффективности кондиционера.

Ключевые слова: кондиционер, теплообмен, термоэлектричество.

Results of calculation of the efficiency of thermoelectric air conditioner with regard to the effect of heat exchange system are presented. Optimal operating conditions of heat exchange system for achieving the highest air conditioner efficiency are determined.

Key words: air conditioner, heat exchange, thermoelectricity.

Введение

Общая характеристика проблемы. Улучшение эффективности термоэлектрических кондиционеров (ТЭК) [1], чаще всего, сводится к повышению добротности [2] термоэлектрических материалов. Однако их эффективность не в меньшей мере зависит и от теплообменных приборов и систем, которыми производится передача тепловой энергии через термоэлектрические преобразователи энергии (так называемые тепловые насосы). Предварительный анализ показывает, что реальные значения эффективности термоэлектрических кондиционеров находятся значительно ниже от ожидаемых даже при достигнутых значениях добротности материалов. Это связано с тем, что при проектировании и оптимизации термоэлектрической аппаратуры в основном пользуются упрощенными физическими моделями [3-6], которые не учитывают качества систем теплообмена, тепловых и электрических потерь, которые могут значительно ухудшить энергетические характеристики ТЭК. В работе [7] рассмотрена методика расчета эффективности ТЭК для обобщенных физических моделей термоэлектрических преобразователей энергии.

Целью данной работы является анализ влияния реальной системы теплообмена на эффективность термоэлектрического кондиционера и оптимизация его работы. Для этого проведена многопараметрическая компьютерная оптимизация эффективности ТЭК с учетом экспериментально определенных характеристик системы теплообмена.

1. Физическая модель ТЭК

Физическая модель ТЭК представлена на рис. 1. Охлаждение замкнутого объема 1 осуществляется при помощи термоэлектрических модулей охлаждения 7. Система отвода тепла

состоит из холодного 5 и горячего 10 контуров. Холодный контур содержит жидкостно-воздушный теплообменник 3 с вентилятором 2, жидкостный насос 4 и жидкостный теплообменник 6. Холодный контур обеспечивает отвод тепла от камеры охлаждения 1 к термоэлектрическим модулям. Горячий контур содержит жидкостный теплообменник 8, жидкостный насос 9 и жидкостно-воздушный теплообменник 11 с вентилятором 12. Горячим контуром обеспечивается отвод тепла от термоэлектрических модулей в окружающую среду. Потребителями электрической энергии в физической модели являются термоэлектрические модули электрической мощностью W_m , вентиляторы жидкостно-воздушных теплообменников электрической мощностью W_{v1} и W_{v2} , и жидкостные насосы электрической мощностью W_{n1} и W_{n2} , соответственно для горячего и холодного контуров.

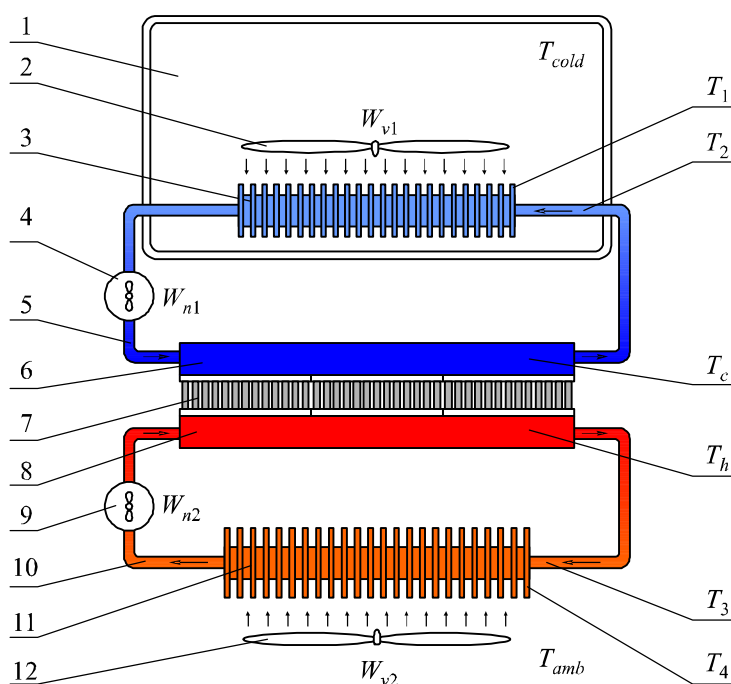


Рис. 1. Физическая модель термоэлектрического кондиционера:

- 1 – камера охлаждения; 2, 12 – вентиляторы;
- 3, 11 – жидкостно-воздушные теплообменники; 4, 9 – жидкостные насосы;
- 5, 10 – жидкостные контуры; 6, 8 – жидкостные теплообменники;
- 7 – термоэлектрические модули охлаждения.

2. Эффективность ТЭК

Система кондиционирования характеризуется такими параметрами как холодопроизводительность Q_0 , т.е. количество теплоты, отводящееся от камеры охлаждения (она зависит от разности температур на термоэлектрических модулях, притока тепла через изоляцию камеры кондиционера из окружающей среды и качества системы теплообмена), а также холодильным коэффициентом ε – отношение холодопроизводительности Q_0 к затраченной на питание термоэлектрических модулей, вентиляторов и жидкостных насосов, электрической энергии. Очевидно, что реальный холодильный коэффициент ТЭК будет значительно отличаться от холодильного коэффициента термоэлектрических модулей. Причем он будет зависеть от значений электрической мощности всех потребителей системы:

$$\varepsilon(W_{n1}, W_{n2}, W_{v1}, W_{v2}, W_m, N) = \frac{Q_0}{W_{n1} + W_{n2} + W_{v1} + W_{v2} + W_m}, \quad (1)$$

где N – количество термоэлектрических модулей.

Таким образом, для достижения максимального холодильного коэффициента ТЭК необходимо найти оптимальные режимы работы каждой из компонент системы теплообмена. Для этого в работе использованы экспериментальные зависимости параметров компонент системы теплообмена от мощности потребления ими электрической энергии и проведен поиск многопараметрического максимума холодильного коэффициента при помощи численных методов.

2.1. Уравнения тепловых и энергетических балансов

Запишем уравнения тепловых балансов в кондиционере:

$$\begin{cases} Q_{r1} = Q_{\text{TEB}} \\ Q_{r2} = Q_{\text{TEB}} + W_0 \end{cases}, \quad (2)$$

где Q_{r1} – количество теплоты, поглощающееся на жидкостно-воздушном теплообменнике холодного контура, оно определяет холодопроизводительность кондиционера Q_0 и соответствует количеству теплоты, поглощающемуся на холодной стороне термоэлектрической батареи; Q_{r2} – количество теплоты, рассеивающееся на жидкостно-воздушном теплообменнике горячего контура, оно соответствует количеству теплоты, выделяющемуся на горячей стороне термоэлектрической батареи; Q_{TEB} – холодопроизводительность термоэлектрической батареи; W_0 – мощность питания термоэлектрической батареи.

Баланс температур будет иметь такой вид:

$$T_{amb} = T_{cold} - \Delta T_{r1} - \Delta T_{t1} + \Delta T_{\text{TEB}} - \Delta T_{t2} - \Delta T_{r2}, \quad (3)$$

где T_{amb} – температура окружающей среды, T_{cold} – заданная температура в изолированной камере. Остальные слагаемые суть перепады температуры на жидкостно-воздушном теплообменнике холодного контура ($\Delta T_{r1} = T_{cold} - T_1$), жидкостном теплообменнике холодного контура ($\Delta T_{t1} = T_2 - T_c$), термоэлектрической батарее ($\Delta T_{\text{TEB}} = T_h - T_c$), жидкостном теплообменнике горячего контура ($\Delta T_{t2} = T_h - T_3$) и жидкостно-воздушном теплообменнике горячего контура ($\Delta T_{r2} = T_3 - T_{amb}$).

Определим следующие функциональные зависимости характеристик компонент кондиционера.

$Q_m(W_m, \Delta T, T_h)$ – зависимость холодопроизводительности термоэлектрических модулей от электрической мощности модулей, перепада температуры на модулях и температуры горячей стороны модулей;

$G(W_n, N)$ – зависимость расхода жидкости в теплообменном контуре от мощности питания насоса и количества термоэлектрических модулей;

$Q_r(W_n, W_v, \Delta T_r, N) = F_r(W_n, W_v, N) \cdot \Delta T_r$ – тепловая мощность, передаваемая жидкостно-воздушным теплообменником в зависимости от мощностей питания жидкостного насоса, вентилятора и разницы температур между воздухом и жидкостью на входе в теплообменник;

$Q_t(\Delta T_t, W_n, N) = F_t(W_n, N) \cdot \Delta T_t$ – тепловая мощность, передаваемая жидкостным теплообменником в зависимости от разницы температур между поверхностью

термоэлектрического модуля и жидкостью на входе в теплообменник, мощности питания жидкостного насоса, вентилятора и разности температур между воздухом и жидкостью на входе в теплообменник.

Исходя из этого, получаем следующие соотношения для нахождения перечисленных в (3) перепадов температур:

$$Q_{r1} = F_r(W_{n1}, W_{v1}, N) \cdot \Delta T_{r1} = Q_0, \quad (4)$$

$$Q_{r2} = F_r(W_{n2}, W_{v2}, N) \cdot \Delta T_{r2} = Q_0 + W_0, \quad (5)$$

$$Q_{t1} = F_t(W_{n1}, N) \cdot \Delta T_{t1} = Q_0, \quad (6)$$

$$Q_{t2} = F_t(W_{n2}, N) \cdot \Delta T_{t2} = Q_0 + W_0. \quad (7)$$

Холодопроизводительность кондиционера будем искать из уравнения (8)

$$Q_0 = Q_{\text{ТЕВ}}(W_0, \Delta T_{\text{ТЕВ}}, T_h). \quad (8)$$

Выражение для перепада температуры на термоэлектрической батарее $\Delta T_{\text{ТЕВ}}$ получаем, подставив (4) – (7) в (2):

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{ТЕВ}} = T_{\text{amb}} - T_{\text{cold}} + Q_0 \left(\frac{1}{F_r(W_{n1}, W_{v1}, N)} + \frac{1}{F_t(W_{n1}, N)} \right) + \\ + (Q_0 + W_0) \left(\frac{1}{F_r(W_{n2}, W_{v2}, N)} + \frac{1}{F_t(W_{n2}, N)} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Выражение для T_h получаем из уравнения

$$T_h = T_{\text{amb}} + \Delta T_{r2} + \Delta T_{t2}. \quad (10)$$

Подставив (4) и (6) в (10), получаем:

$$T_h = T_{\text{amb}} + (Q_0 + W_0) \left(\frac{1}{F_r(W_{n2}, W_{v2}, N)} + \frac{1}{F_t(W_{n2}, N)} \right). \quad (11)$$

Выражения (8), (9) и (11) образуют систему уравнений для нахождения холодопроизводительности кондиционера Q_0 , которую решают относительно Q_0 , $\Delta T_{\text{ТЕВ}}$, T_h при заданных значениях величин T_{amb} , T_{cold} , функций $F_r(W_n, W_v, N)$, $F_t(W_n, N)$ и $Q_{\text{ТЕВ}}(W_0, \Delta T_{\text{ТЕВ}}, T_h)$.

Холодильный коэффициент кондиционера находят из уравнения (1). Целевой функцией оптимизации является холодильный коэффициент кондиционера, а параметрами оптимизации – электрические мощности компонент кондиционера.

2.2. Методы оптимизации

Достаточно громоздкие и сложные критерии оптимума, описанные выше, обуславливают необходимость использования числовых методов для поиска оптимального значения целевой функции.

Целевая функция термоэлектрического кондиционера – холодильный коэффициент –

функция нелинейная, зависящая от совокупности параметров, которые в свою очередь выражены неявно, при помощи множества эмпирических уравнений. Поэтому нет возможности использовать методы поиска экстремума первого и второго порядков (из-за невозможности определения производных). Для реализации поиска оптимального значения холодильного коэффициента был применен безградиентный метод нулевого порядка – модифицированный метод Хука-Дживса [8].

На каждой итерации главного цикла программы решается система нелинейных уравнений (8 – 11) и определяется холодопроизводительность. В программе рассчитываются коэффициенты аппроксимирующих полиномов, при помощи которых определяются эмпирические соотношения между физическими параметрами задачи оптимизации.

3. Оптимизация ТЭК

3.1. Эмпирические функции параметров компонент ТЭК

Термоэлектрические модули. На основе экспериментальных исследований зависимости холодопроизводительности термоэлектрических модулей охлаждения Алтек-127 от мощности питания и температур теплообменников на их горячих и холодных гранях в численных расчетах функция холодопроизводительности модуля Q_m была аппроксимирована аналитическими зависимостями:

$$Q_m(W_m, \Delta T, T_h) = [F_m(W_m)(1 - 0.0015\Delta T) - (1.334 - 0.00233T_h)\Delta T] \times (0.07217 + 0.00317T_h), \quad (12)$$

где
$$F_m = (8.45\sqrt{W_m} - 0.115 - 0.37W_m + 3.25). \quad (13)$$

Жидкостные насосы. Зависимость расхода жидкости в теплообменном контуре от мощности насоса и количества модулей определялась следующим образом:

$$G(W_n, N) = \frac{\Delta P_{\max}(W_n)}{r_g + NR_g^t}, \quad (14)$$

где $\Delta P_{\max}(W_n)$ – зависимость максимального давления насоса от его мощности, R_g^t – гидросопротивление жидкостного теплообменника, r_g – гидросопротивление теплообменного контура без теплообменников.

Из экспериментов с жидкостным насосом были установлены следующие зависимости:

$$\Delta P_{\max}(W_n) = 0.01283W_n \text{ (атм.)}, \quad (15)$$

$$G(W_n, N) = \frac{0.01283W_n}{6.31 \cdot 10^{-4} + N \cdot 1.835 \cdot 10^{-3}} \text{ (мл/с)}. \quad (16)$$

Жидкостно-воздушные теплообменники. Экспериментальными исследованиями установлены значения мощности, которую они могут передать от жидкости в воздух в зависимости от перепада между температурой на входе теплообменника и температурой воздуха, расхода воды в теплообменном контуре и мощности питания $Q_r(\Delta T_r, G, W_v)$. Учитывая, что $G = G(W_n, N)$, а $Q_r \sim \Delta T_r$, величина Q_r представлена в виде

$$Q_r(W_n, W_v, \Delta T, N) = F_r(W_n, W_v, N) \cdot \Delta T_r, \quad (17)$$

где $F_r(W_n, W_v, N)$ – экспериментальная функция, характеризующая теплообменник.

Для исследуемого теплообменника функция F_r аппроксимирована следующим образом:

$$F(W_n, W_v, N) = [15.5783 + 0.3402G(W_n, N) - 0.0018G(W_n, N)^2] \times [0.15 + 0.14125W_v - 0.00437W_v^2]. \quad (18)$$

Жидкостные теплообменники. Экспериментально установлена зависимость мощности жидкостного теплообменника $Q_t(\Delta T_t, G)$ от перепада температур между водой на входе и выходе теплообменника и от расхода воды в теплообменном контуре. Учитывая, что $G = G(W_n, N)$ и $Q_t \sim \Delta T_t$, зависимость Q_t будем искать в следующем виде

$$Q_t(\Delta T_t, W_n, N) = F_t(W_n, N) \cdot \Delta T_t, \quad (19)$$

где $F_t(W_n, N)$ – эмпирическая функция, характеризующая теплообменник. Для исследуемого теплообменника для нее найдена зависимость:

$$F_t(W_n, N) = N [2.5349 + 0.08292G(W_n, N) - 3.02648 \cdot 10^{-4} G(W_n, N)^2]. \quad (20)$$

3.2. Результаты оптимизации ТЭК

Результатом оптимизации термоэлектрического кондиционера является нахождение условий работы компонент кондиционера, при которых холодильный коэффициент достигает максимальных значений.

Используя алгоритмы и программу, описанную в п. 2, сделаны расчеты холодильного коэффициента кондиционера ε_0 для следующих исходных параметров задачи:

- температура окружающей среды $T_{amb} = 20, 25, 30, 35, 40$ °С;
- снижение температуры в камере $\Delta T = T_{amb} - T_{cold} = 10, 15, 20$ °С.

В таблицах 1 – 3 приведены результаты расчета максимального холодильного коэффициента ε_{max} кондиционера и его холодопроизводительности в зависимости от количества термоэлектрических модулей N . Также в таблице указано, при каких мощностях питания систем кондиционера достигается максимальное значение холодильного коэффициента.

Таблица 1

Максимальный холодильный коэффициент кондиционера

при $T_{amb} = 20$ °С, $\Delta T = 10$ °С

N	ε_{max}	Q_0 , Вт	W_0 , Вт	W_{n1} , Вт	W_{v1} , Вт	W_{n2} , Вт	W_{v2} , Вт
2	0.519	24.38	21	5	8	5	8
4	0.628	32.01	25	5	8	5	8
6	0.667	36.01	28	5	8	5	8
8	0.676	38.58	31	5	8	5	8.1
10	0.668	41.86	35	5	8.5	5	9.5
20	0.587	41.36	48	5	10	5	12

Таблица 2

Максимальный холодильный коэффициент кондиционера
 при $T_{amb} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

N	ϵ_{max}	Q_0 , Вт	W_0 , Вт	W_{n1} , Вт	W_{v1} , Вт	W_{n2} , Вт	W_{v2} , Вт
2	0.422	22.34	27	5	8	5	8
4	0.475	29.92	35	5	8	5	8
6	0.481	32.68	42	5	8	5	8
8	0.468	36.94	50	5	8	7	11
10	0.448	40.06	58	5	9.5	9	12
20	0.331	40.99	87	5	11	21	12

Таблица 3

Максимальный холодильный коэффициент кондиционера
 при $T_{amb} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

N	ϵ_{max}	Q_0 , Вт	W_0 , Вт	W_{n1} , Вт	W_{v1} , Вт	W_{n2} , Вт	W_{v2} , Вт
2	0.334	20.03	34	5	8	5	8
4	0.353	28.70	51	5	8	8	9.5
6	0.340	38.48	75	5	8	16	10
8	0.320	43.0	87	5	9	22	12
10	0.26	40.2	124	5.6	10.5	25	12
20	0.18	39.3	162	6	12	28	12

Сравнение холодильного коэффициента термоэлектрических модулей и кондиционера при других оптимальных условиях работы компонент ТЭЖ показано на рис. 2.

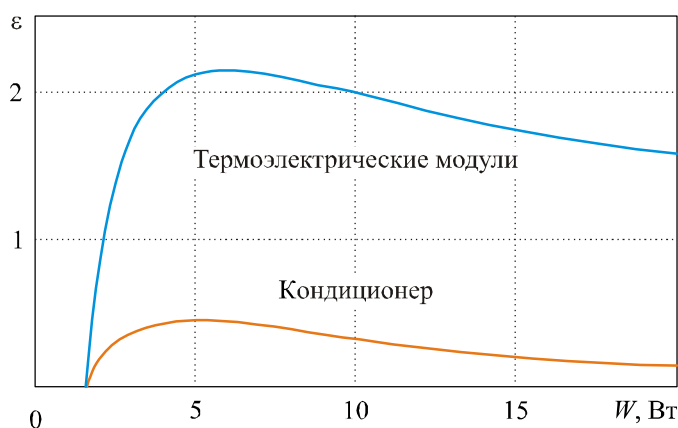


Рис. 2. Зависимости холодильного коэффициента термоэлектрических модулей и ТЭЖ от мощности питания электрических модулей при $T_{amb} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Выводы

1. Разработаны физическая и математическая модели кондиционера, алгоритмы и компьютерная программа поиска многопараметрического максимума холодильного коэффициента ТЭК.
2. Для конкретных конструкций термоэлектрического кондиционера обнаружены многопараметрические максимумы холодильного коэффициента в диапазонах мощностей работы термоэлектрической батареи, жидкостных насосов, воздушных вентиляторов для заданной глубины охлаждения.
3. Установлено, что даже при оптимальных условиях работы компонент кондиционера холодильный коэффициент ТЭК отличается в ~ 7 раз от холодильного коэффициента термоэлектрических модулей. Это свидетельствует о необходимости усовершенствования компонент теплообменных систем ТЭК.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии / Л.И. Анатычук – Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества. – 2003. – 376 с.
2. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. – 2007. – №2. – С. 7 – 20.
3. Термоэлектрический кондиционер для помещений / Л.И. Анатычук, К. Мисава, Н. Судзуки [и др.] // Термоэлектричество. – 2003. – №1. – С. 55 – 58.
4. Розвер Ю.Ю. Термоэлектрический кондиционер для транспортных средств / Ю.Ю. Розвер // Термоэлектричество. – 2003. – №2. – С. 71 – 74.
5. <http://www.fujitaka.com>
6. <http://www.hi-z.com>
7. Анатычук Л.И. О влиянии теплообменных систем на эффективность термоэлектрических приборов. / Л.И. Анатычук, А.В. Прибыла // Термоэлектричество. – 2012. – №3. – С. 42 – 47.
8. Вержбицкий В.М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения): Учеб. пособие для вузов / В.М. Вержбицкий – М.: «Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2005. – 432 с.

Поступила в редакцию 19.12.2012.