

УДК 537.32



Анатычук Л.И.

Анатычук Л.И.^{1,2}, Прибыла А.В.¹

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН
Украины, ул. Науки, 1, Черновцы, 58029, Украина

²Черновицкий национальный университет
им. Ю. Федьковича, ул. Коцюбинского, 2,
Черновцы, 58000, Украина



Прибыла А.В.

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ

В работе приводятся результаты компьютерного моделирования термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость. Рассмотрены наиболее рациональные варианты электрического питания теплового насоса. Путем многопараметрической компьютерной оптимизации определены параметры системы питания термоэлектрического теплового насоса, позволяющие достигнуть повышения его отопительного коэффициента на 15 %.

Ключевые слова: термоэлектрический тепловой насос, компьютерное моделирование, система регенерации воды.

The paper presents the results of computer simulation of the thermoelectric heat pump is a liquid-liquid system. Consideration of the most rational variants of electric power supply of the heat pump. By multiparametric optimization of the parameters of the computer system power thermoelektricheskogo heat pump can achieve increasing its heating rate of 15%.

Key words: термоэлектрический тепловой насос, компьютерное моделирование, регенерации воды.

Введение

Общая характеристика проблемы. Применение термоэлектрических тепловых насосов (ТТН) в системах кондиционирования воздуха и жидкости, испарителях специального назначения связано с их уникальными преимуществами [1-5].

Примером эффективного использования термоэлектрических тепловых насосов являются системы регенерации воды из жидких отходов жизнедеятельности на борту пилотируемых космических аппаратов (урины, конденсата атмосферной влаги, санитарно-гигиенической воды) [4, 5].

В работе [8] приводятся результаты компьютерного моделирования термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость. Путем многопараметрической компьютерной оптимизации определены конструктивные параметры компоновки термоэлектрических модулей и теплообменников термоэлектрического теплового насоса. Следующим этапом этой работы является компьютерная оптимизация параметров системы питания термоэлектрического

теплового насоса, что позволит достигнуть дальнейшего повышения его эффективности.

Целью данной работы является повышение эффективности термоэлектрического теплового насоса путем проведения его многопараметрического компьютерного моделирования и оптимизации параметров системы питания.

Физическая модель ТТН

Физическая модель термоэлектрического теплового насоса представлена на рис. 1. Она состоит из жидкостной системы теплообмена, обеспечивающей прохождение теплового потока Q_x через холодную сторону термоэлектрических модулей 1, собственно термоэлектрических модулей 2, состоящих из полупроводниковых ветвей n - и p -типа проводимости, и жидкостной системы теплообмена 3, обеспечивающей прохождение теплового потока Q_r через их горячую сторону.

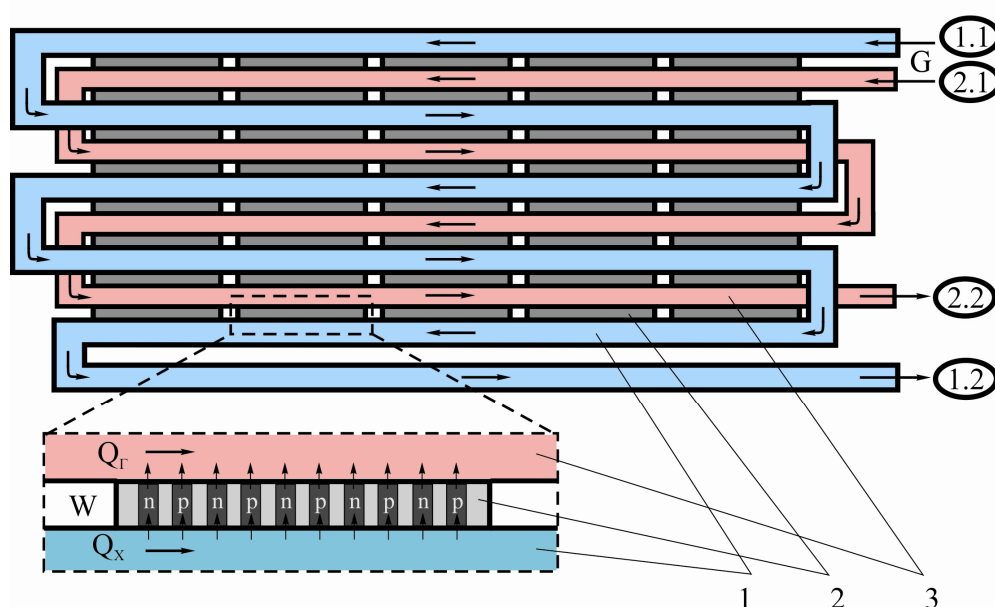


Рис. 1. Физическая модель термоэлектрического теплового насоса.

В жидкостной системе теплообмена циркулирует теплоноситель (урина, конденсат атмосферной влаги, санитарно-гигиеническая вода) с расходом G мл/с. Были рассмотрены два варианта подключения теплоносителей. В первом случае теплоносители в горячей 3 и холодной 1 системе теплообмена двигаются в одном направлении ($1.1 \rightarrow 1.2$; $2.1 \rightarrow 2.2$), а во втором – навстречу друг другу ($1.1 \rightarrow 1.2$; $2.2 \rightarrow 2.1$). Кроме того, рассмотрены различные варианты питания W термоэлектрических модулей 2:

- 1) все модули питаются одним током и напряжением, оптимальными для всего теплового насоса;
- 2) модули сгруппированы в секции, питание каждой из которых оптимизируется отдельно;
- 3) питание всех термоэлектрических модулей осуществляется индивидуально.

Математическое и компьютерное описание модели

Для описания потоков тепла и электричества воспользуемся законами сохранения энергии

$$\operatorname{div} \vec{E} = 0 \quad (1)$$

и электрического заряда

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0, \quad (2)$$

где

$$\vec{E} = \vec{q} + U\vec{j}, \quad (3)$$

$$\vec{q} = \kappa \nabla T + \alpha T \vec{j}, \quad (4)$$

$$\vec{j} = -\sigma \nabla U - \sigma \alpha \nabla T. \quad (5)$$

Здесь \vec{E} – плотность потока энергии, \vec{q} – плотность теплового потока, \vec{j} – плотность электрического тока, U – электрический потенциал, T – температура, α , σ , κ – коэффициенты термоЭДС, электропроводности и теплопроводности.

Учитывая (3) – (5), можно получить

$$\vec{E} = -(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T - (\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U. \quad (6)$$

Тогда законы сохранения (1), (2) приобретают вид:

$$-\nabla [(\kappa + \alpha^2 \sigma T + \alpha U \sigma) \nabla T] - \nabla [(\alpha \sigma T + U \sigma) \nabla U] = 0, \quad (7)$$

$$-\nabla (\sigma \alpha \nabla T) - \nabla (\sigma \nabla U) = 0. \quad (8)$$

Этими нелинейными дифференциальными уравнениями второго порядка в частных производных (7) и (8) определяются распределения температуры T и потенциала U в термоэлементах.

Уравнение, описывающее процесс переноса тепла в стенках теплообменников в стационарном случае, записывается следующим образом:

$$\nabla (-k_1 \cdot \nabla T_1) = Q_1, \quad (9)$$

где k_1 – коэффициент теплопроводности стенок теплообменника, ∇T_1 – градиент температуры, Q_1 – тепловой поток.

Процессы тепло- и массообмена теплоносителей в каналах теплообменников в стационарном случае описываются уравнениями [9]

$$-\Delta p - f_D \frac{\rho}{2d_h} v |\vec{v}| + \vec{F} = 0, \quad (10)$$

$$\nabla (A \rho \vec{v}) = 0, \quad (11)$$

$$\rho A C_p \vec{v} \cdot \nabla T_2 = \nabla \cdot A k_2 \nabla T_2 + f_D \frac{\rho A}{d_h} |\vec{v}|^3 + Q_2 + Q_{wall}, \quad (12)$$

где p – давление, ρ – плотность теплоносителя, A – поперечное сечение трубы, \vec{F} – сумма всех сил, C_p – теплоемкость теплоносителя, T_2 – температура, \vec{v} – вектор скорости, k_2 – теплопроводность теплоносителя, f_D – коэффициент Дарси, $d = \frac{4A}{Z}$ – эффективный диаметр, Z – периметр стенки трубы, Q_2 – тепло, которое выделяется за счет вязущего трения [Вт/м] (из единицы длины теплообменника), Q_{wall} – тепловой поток, поступающий от теплоносителя к стенкам трубы [Вт/м]

$$Q_{wall} = h \cdot Z \cdot (T_1 - T_2), \quad (13)$$

где h – коэффициент теплоотдачи, который определяется из уравнения

$$h = \frac{Nu \cdot k_2}{d}. \quad (14)$$

Для определения числа Нуссельта используется уравнения Gnielinski ($3000 < Re < 6 \cdot 10^6$, $0.5 < Pr < 2000$)

$$Nu = \frac{\left(\frac{f_d}{8}\right)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\left(\frac{f_d}{8}\right)^{\frac{1}{2}}\left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}, \quad (15)$$

где $Pr = \frac{C_p \mu}{k_2}$ – число Прандтля, μ – динамическая вязкость, $Re = \frac{\rho v d}{\mu}$ – число Рейнольдса.

Для определения коэффициента Дарси f_D используем уравнение Churchill для всего спектра числа Рейнольдса и всех значений e/d (e – шероховатость поверхности стенки)

$$f_D = 8 \left[\frac{8}{Re}^{12} + (A + B)^{-1.5} \right]^{1/12}, \quad (16)$$

где $A = \left[-2.457 \cdot \ln \left(\left(\frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27(e/d) \right) \right]^{16}$, $B = \left(\frac{37530}{Re} \right)^{16}$.

Из решения уравнения (7) – (12) мы получим распределения температур, электрического потенциала (для термоэлементов), скоростей и давления (для теплоносителя).

Для решения рассмотренных выше дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями был использован пакет прикладных программ Comsol Multiphysics. С его помощью проведена многопараметрическая оптимизация конструкции термоэлектрического теплового насоса и определены электрические и тепловые параметры для достижения граничных значений его отопительного коэффициента при обеспечении возможности функционирования ТТН в жестких условиях проведения пилотируемых космических миссий.

Результаты компьютерного моделирования

Ниже приведены результаты оптимизации параметров электрического питания термоэлектрических модулей (согласно модели в п. 1) для реальных тепловых и температурных условий работы теплового насоса. Результаты компьютерных исследований конструкции термоэлектрических модулей, а также системы теплообмена являются очень важными и будут подробно представлены в следующей работе.

Исходные данные:

электрическая мощность питания термоэлектрических модулей – 300 Вт;

количество термоэлектрических модулей – 80 шт.;

температура теплоносителя на входе в горячий теплообменный контур – 36 °С;

температура теплоносителя на входе в холодный теплообменный контур – 31.5 °С;

гидравлическое сопротивление каждого из теплообменных контуров – не более 0.07 атм.; расход теплоносителя в каждом контуре – не более 22 мл/с.

Таким образом, были рассчитаны значения интегрального отопительного коэффициента для различных вариантов электрического питания термоэлектрических модулей:

- 1) все модули питаются одним током и напряжением, оптимальными для всего теплового насоса;
- 2) модули сгруппированы в две секции, питание каждой из которых оптимизируется отдельно;
- 3) модули сгруппированы в четыре секции, питание каждой из которых оптимизируется отдельно;
- 4) питание всех термоэлектрических модулей оптимальным током осуществляется индивидуально (80 условных секций).

Как показывают результаты моделирования (рис. 2) при таком гидравлическом подключении горячего и холодного теплообменных контуров, когда оба теплоносителя двигаются в противоположных направлениях (направление 1.1→1.2; 2.2→2.1 на рис.1), отопительный коэффициент теплового насоса практически не зависит от количества секций и находится на уровне $\sim 2.6 \div 2.7$. В случае же, когда теплоносители двигаются в одном направлении (направление 1.1→1.2; 2.1→2.2 на рис. 1), увеличение количества секций с индивидуальным оптимальным питанием приводит к росту отопительного коэффициента до уровня $\sim 3.0 \div 3.1$.

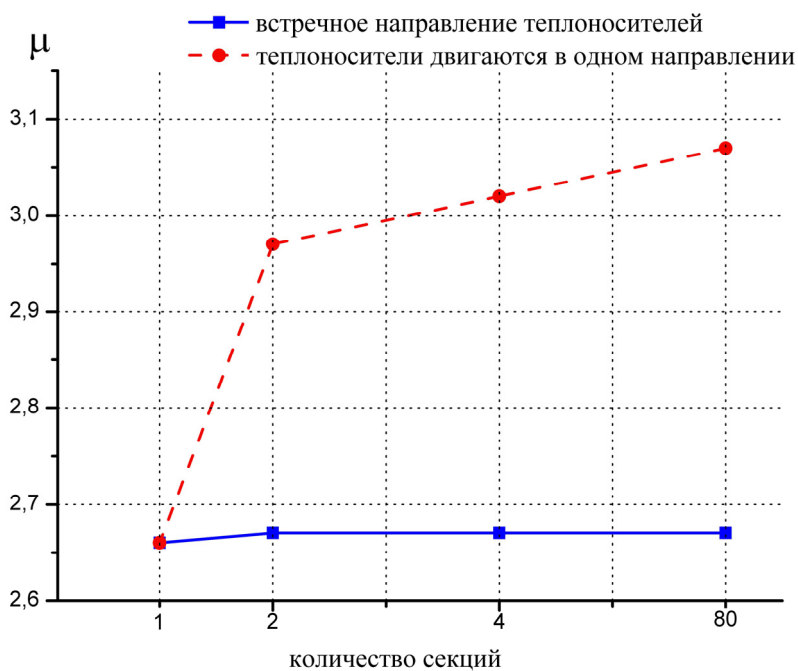


Рис. 2. Зависимость отопительного коэффициента термоэлектрического теплового насоса от количества секций для двух различных гидравлических подключений теплоносителей.

Увеличение отопительного коэффициента термоэлектрического теплового насоса на 15% для таких условий связано с тем, что зависимость отопительного коэффициента термоэлектрических модулей от перепада температур и тока питания в каждой секции является нелинейной. Использование нескольких независимых секций, в таком случае, позволяет

наиболее эффективно реализовать все преимущества термоэлектрического преобразования энергии в каждом диапазоне температур.

Выводы

1. Рассчитаны оптимальные энергетические параметры термоэлектрического теплового насоса для реальных условий его функционирования.
2. Установлено, что увеличения количества секций термоэлектрического теплового насоса с индивидуальным электрическим питанием каждой из секций приводит к росту интегрального отопительного коэффициента на 15%.
3. Показано, что наиболее эффективным гидравлическим подключением горячего и холодного теплообменного контуров является случай, когда оба теплоносителя движутся в одном направлении.

Литература

1. Розвер Ю.Ю. Термоэлектрический кондиционер для транспортных средств // Термоэлектричество. – № 2. – 2003. – С. 52-56.
2. Анатычук Л.И., Вихор Л.Н., Розвер Ю.Ю. Исследование характеристик термоэлектрического охладителя потоков жидкости или газа // Термоэлектричество. – № 1. – 2004. – С. 73-80.
3. Анатычук Л.И., Сузуки Н., Розвер Ю.Ю. Термоэлектрический кондиционер для помещений // Термоэлектричество. – №3. – 2005. – С. 53-56.
4. Разработка и испытание системы регенерации воды из жидких отходов жизнедеятельности на борту пилотируемых космических аппаратов с использованием термоэлектрического теплового насоса / В.Г. Риферт, В.И. Усенко, П.А. Барабаш [и др.] // Термоэлектричество. – 2011. – № 2. – С. 63 – 74.
5. Термоэлектрический тепловой насос, как средство повышения эффективности систем очистки воды при космических полетах / Анатычук Л.И., Барабаш П.А., Риферт В.Г., Розвер Ю.Ю., Усенко В.И., Черкез Р.Г. // Термоэлектричество. – 2013. – № 6. – С. 78 – 83.
6. Анатычук Л.И. Рациональные области исследований и применений термоэлектричества / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. – 2001. – № 1. – С. 3 – 14.
7. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества / Л.И. Анатычук // Термоэлектричество. – 2007. – № 2. – С. 7 – 20.
8. Анатычук Л.И., Прибыла А.В. Оптимизация тепловой коммутации в термоэлектрических тепловых насосах жидкость-жидкость для приборов очистки воды космического назначения. – № 4. – 2015.

Поступила в редакцию 10.12.15.