

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 ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ КОММУТАЦИИ В ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСАХ ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ

В работе приводятся результаты компьютерного моделирования термоэлектрического теплового насоса системы жидкость-жидкость. В результате мультипараметрической компьютерной оптимизации определены параметры и компоновка термоэлектрических модулей и теплообменников термоэлектрического теплового насоса для достижения наибольшей эффективности.

Ключевые слова: термоэлектрический тепловой насос, компьютерное моделирование, система жидкость-жидкость.

The paper presents the results of computer simulation thermoelectric heat pump liquid-liquid system. Consideration of its most rational design options. By multiparametric computer optimization design parameters determined by the placement of thermoelectric modules and heat exchangers thermoelectric heat pump to achieve maximum efficiency.

Key words: thermoelectric heat pump, computer simulation, liquid-liquid system.

Введение

Общая характеристика проблемы. Использование термоэлектрических тепловых насосов (ТТН) в системах кондиционирования обусловлено их уникальными свойствами [1-5]: экологичностью (в таких устройствах отсутствуют токсичные хладагенты); надежностью (стойкость к механическим воздействиям, длительный ресурс работы); независимостью от ориентации в пространстве (возможность работы в отсутствии гравитации) [6, 7].

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). Испытания эффективности таких аппаратов на стенде NASA показали, что по важнейшим показателям: удельному расходу энергии, габаритам, весу и качеству получаемого дистиллята система очистки воды с термоэлектрическим тепловым насосом превосходит известные аналоги космического назначения [4, 5].

Однако, используемые в разнообразных устройствах термоэлектрические тепловые насосы могут быть улучшены путем создания оптимальных условий работы для каждого

термоэлектрического модуля и теплообменных устройств. Такая многофакторная задача не поддается аналитическому решению, что вызывает необходимость применения современных методов компьютерного объектно-ориентированного программирования для решения задачи многопараметрической оптимизации конструкции термоэлектрического теплового насоса.

Целью данной работы является поиск путей повышения эффективности термоэлектрического теплового насоса путем проведения многопараметрического компьютерного моделирования и оптимизации размещения термоэлектрических модулей и теплообменников системы жидкость-жидкость.

Физическая модель ТТН

Физическая модель термоэлектрического теплового насоса представлена на рис. 1 а, б. Она состоит из теплообменников 1, обеспечивающих прохождение теплового потока Q_G через горячую сторону термоэлектрических модулей, собственно термоэлектрических модулей 3, теплообменников 2, обеспечивающих прохождение теплового потока Q_X через холодную сторону термоэлектрических модулей и системы гидравлично связанных каналов 4, обеспечивающих циркуляцию жидкости в термоэлектрическом тепловом насосе.

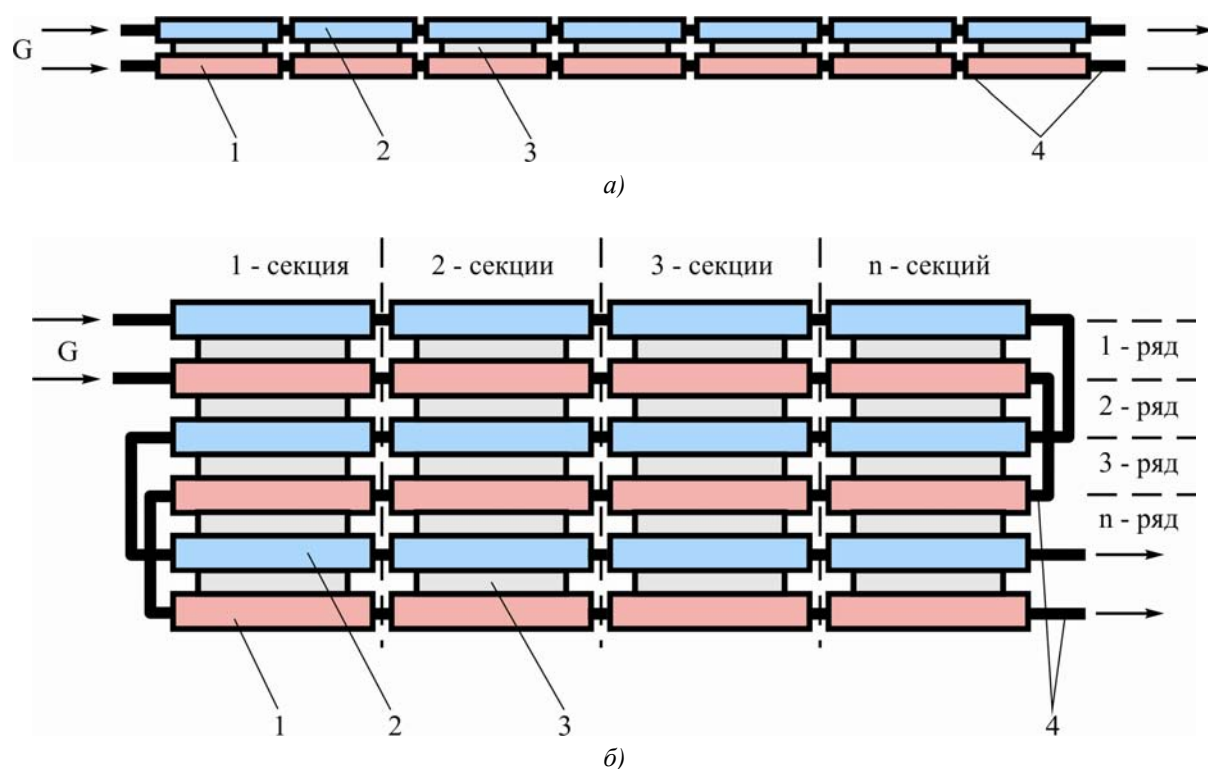


Рис. 1. Физическая модель термоэлектрического теплового насоса:

1 – горячие теплообменники, 2 – холодные теплообменники,

3 – термоэлектрические модули,

4 – каналы жидкостной системы теплообмена.

В простейшем случае такая модель представляет собой последовательно соединенные горячие 1 и холодные теплообменники 2, между которыми находятся термоэлектрические модули 3 (рис. 1 а). Однако практическая реализация такой конструкции не всегда может быть рациональной. Это связано с значительным увеличением массогабаритных параметров устройства. На практике

удобно соединять такие теплообменники 1, 2 с термоэлектрическими модулями 3 в ряды с различным количеством секций. Таким образом, уменьшение количества элементарных секций (термоэлектрических модулей с теплообменниками) (рис. 1 б) теплового насоса будет приводить к увеличению количества размещенных один над другим рядов. В этом случае один теплообменник можно использовать двумя термоэлектрическими модулями (рис.1 б), что позволит значительно уменьшить количество теплообменников. С другой стороны, рост количества рядов приведет к увеличению количества соединительных элементов 4 жидкостной системы теплообмена, что приведет к возрастанию ее гидравлического сопротивления.

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:

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

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

Нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка в частных производных (7) и (8) определяют распределения температуры T и потенциала U в термоэлементах.

В стационарном случае уравнение, описывающее процесс переноса тепла в стенках теплообменников, 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 [8]

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

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

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

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, выделяемое вследствие вязкого трения [Вт/м] на единице 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

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

Здесь Nu – число Нуссельта, определяющееся из уравнения:

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

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

$3000 < Re < 6 \cdot 10^6$, $0.5 < Pr < 2000$.

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

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

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

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.

Результаты компьютерного моделирования

Ниже приведены результаты оптимизации размещения термоэлектрических модулей и теплообменников для реальных тепловых и температурных условий работы теплового насоса. Результаты компьютерных исследований конструкции теплообменников, а также электрического питания термоэлектрических модулей 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 – 0.07 атм;

расход теплоносителя в каждом контуре – 22 мл/с.

Таким образом были рассчитаны значения интегрального отопительного коэффициента и уменьшения веса устройства (в процентном отношении) для различных вариантов конструкции термоэлектрического теплового насоса:

- 1) 1 ряд из 80 термоэлектрических модулей и 160 теплообменников (рис.1 а);
- 2) 4 ряда из 40 термоэлектрических модулей и 120 теплообменников (рис.1 б);
- 3) 8 рядов из 10 термоэлектрических модулей и 90 теплообменников (рис.1 в);
- 4) 16 рядов из 5 термоэлектрических модулей и 85 теплообменников (рис.1 г);
- 5) 40 рядов из 2 термоэлектрических модулей и 82 теплообменников (рис.1 д).

На рис. 2 представлена зависимость отопительного коэффициента термоэлектрического теплового насоса ε от количества рядов. Как и следовало ожидать, наибольшая эффективность у варианта идеализированной модели (рис. 1 а).

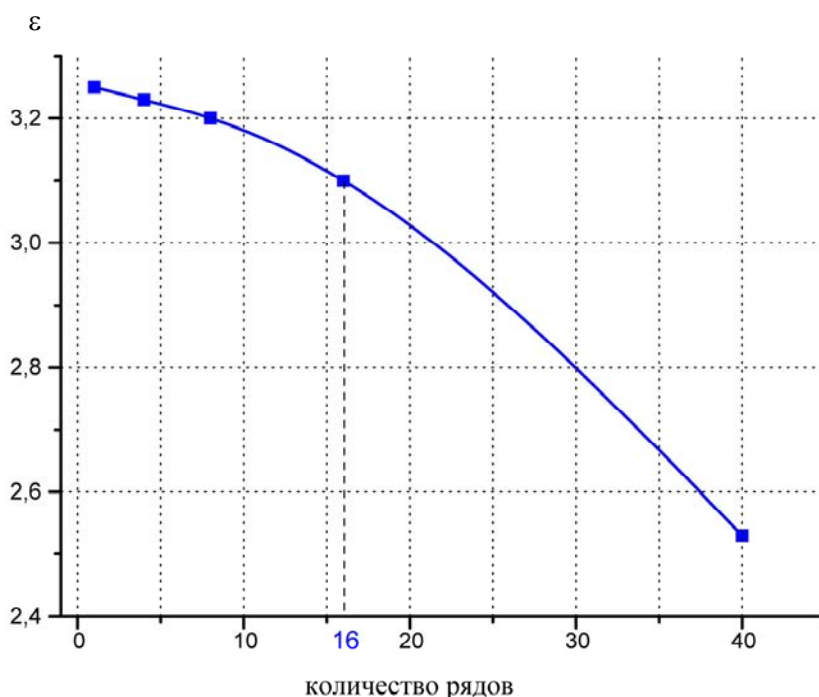


Рис. 2. зависимость отопительного коэффициента термоэлектрического теплового насоса от количества рядов.

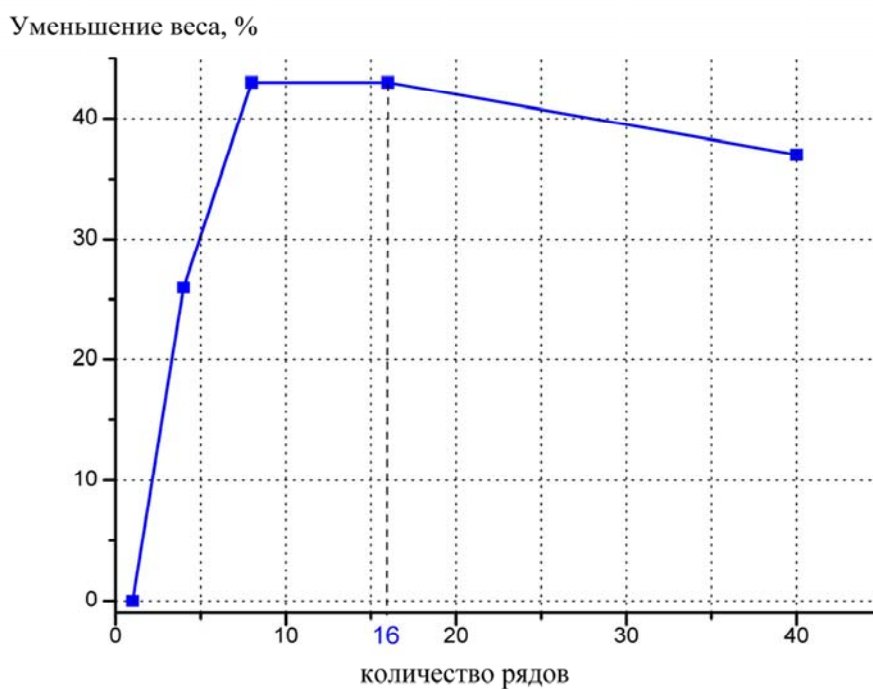


Рис. 3. Зависимость процентного уменьшения веса термоэлектрического теплового насоса от количества рядов.

Для выбора наиболее рациональной конструкции термоэлектрического теплового насоса, важными являются массогабаритные показатели. Анализ процентного уменьшения веса термоэлектрического теплового насоса в зависимости от количества рядов в нем (рис. 3) говорит о наличии оптимума, так как уменьшение количества теплообменников сопровождается увеличением количества соединительных элементов, что утяжеляет конструкцию. Таким образом, обнаружен оптимум, который находится в области 16 рядов по 5 термоэлектрических модулей с 85 теплообменниками.

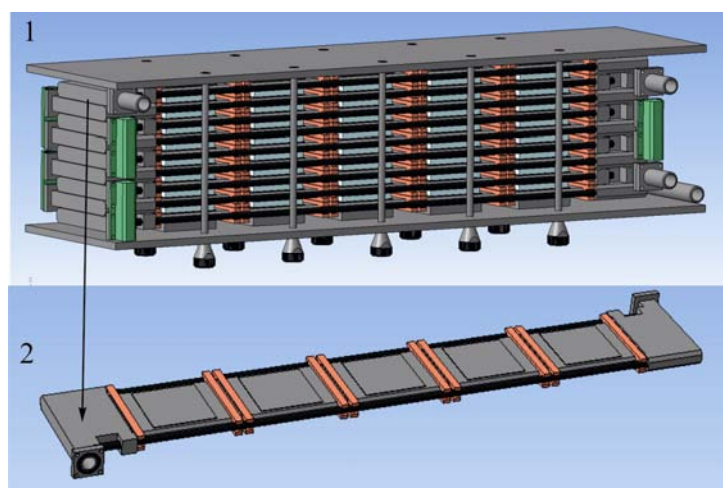


Рис. 4. Термоэлектрический тепловой насос:
1 – внешний вид, 2 – схема одного ряда теплообменников.

Внешний вид оптимизированной конструкции термоэлектрического теплового насоса представлен на рис. 4.

Выводы

1. Разработана методика многопараметрической компьютерной оптимизации термоэлектрических тепловых насосов.
2. Рассчитана зависимость эффективности термоэлектрического теплового насоса от его конструктивных параметров.
3. Показано, что отопительный коэффициент термоэлектрического теплового насоса увеличивается с уменьшением количества размещенных один над другим рядов термоэлектрических модулей с теплообменниками.
4. Установлено, что зависимость процентного уменьшения веса термоэлектрического теплового насоса от количества рядов имеет оптимум в области 16 рядов.
5. Рассчитана возможность повышения эффективности термоэлектрического теплового насоса до 25 % путем выбора оптимальных количества и взаимного размещения термоэлектрических преобразователей и теплообменников системы теплообмена.

Литература

1. Розвер Ю.Ю. Термоелектричний кондиціонер для транспортних засобів // Термоелектрика. – № 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., Сузукі Н., Розвер Ю.Ю. Термоелектричний кондиціонер для приміщень // Термоелектрика. – №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. Michael V. Lurie. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, Weinheim, 2008. – P. 214.

Поступила в редакцию 20.08.2015.