

Анатычук Л.И.^{1,2}, академик Национальной академии наук Украины
Прибыла А.В.^{1,2}, кандидат физико-математических наук



Анатычук Л. И.

¹Институт термоэлектричества НАН и МОН
Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина, e-mail:
anatyukh@gmail.com

²Черновицкий национальный университет имени
Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского 2, Черновцы, 58012, Украина;
e-mail: *anatyukh@gmail.com*



Прибыла А. В.

О ПРЕДЕЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ

В работе приводятся результаты расчетов предельных возможностей термоэлектрических тепловых насосов жидкость-жидкость, в частности для их использование в качестве высокоэффективного нагревателя для прибора очистки воды космического назначения.

Ключевые слова: термоэлектрический тепловой насос, эффективность, дистиллятор.

Введение

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

Примерами эффективного использования термоэлектрических тепловых насосов являются приборы для регенерации воды из жидких отходов жизнедеятельности на борту пилотируемых космических аппаратов (урины, конденсата атмосферной влаги, санитарно-гигиенической воды). Испытание их эффективности на стенде NASA показали, что по самым важным показателям – удельной затрате энергии, габаритам, весу и качеству получаемого дистиллята приборы для очистки воды с термоэлектрическим тепловым насосом превосходят известные аналоги космического назначения [4, 5].

Однако к таким приборам в связи с возможностями их новых применений (пилотируемые миссии освоения Марса и других планет) выдвигаются новые, более высокие требования. Это в основном касается уменьшения их веса, размеров, а также энергетических затрат на функционирование термоэлектрического теплового насоса. Задача дальнейшего повышения качества таких приборов является весьма сложной, поскольку достигнутые значения их эффективности близки к предельным.

Цель работы – определение предельных возможностей термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость для понимания направления дальнейших шагов к повышению его эффективности.

Физическая модель ТТН

Для определения предельных возможностей термоэлектрического теплового насоса использована его упрощенная физическая модель (рис. 1). 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 гидравлически связанных каналов 4, обеспечивающих циркуляцию жидкости в термоэлектрическом тепловом насосе.

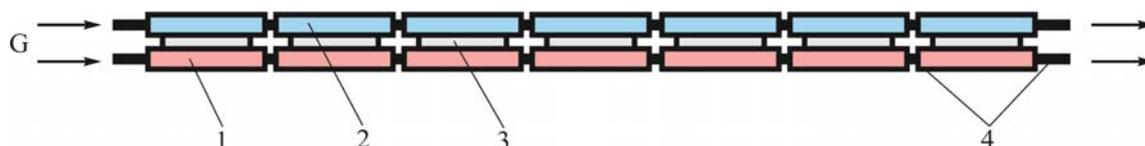


Рис. 1. Простейшая физическая модель термоэлектрического теплового насоса.

В простейшем случае такая модель представляет собой последовательно соединенные горячие 1 и холодные теплообменники 2, между которыми находятся термоэлектрические модули 3. При этом для определения предельно возможных значений эффективности термоэлектрического теплового насоса, мы пренебрегаем потерями энергии на прокачку теплоносителя в теплообменниках и потерями перепада температур в них.

Для обеспечения оптимальной работы термоэлектрических модулей, каждый из них имеет индивидуальный источник питания.

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), получаем:

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

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, которое описывает процесс переноса тепла в стенках теплообменников, записывается так:

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

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

Из решения уравнений (7) – (9) мы получим распределения температур и электрического потенциала в термоэлектрическом тепловом насосе.

Для решения рассмотренных выше дифференциальных уравнений с соответствующими предельными условиями использован пакет прикладных программ COMSOL Multiphysics.

Результаты компьютерного моделирования

Ниже приведены результаты расчетов параметров термоэлектрического насоса согласно физической модели, изображенной на рис.1. Было определено оптимальное количество термоэлектрических модулей N для обеспечения необходимой холодопроизводительности Q_0 , а также оптимальный ток питания $I_{\text{опт}}$ каждого из модулей для обеспечения наивысшего интегрального холодильного коэффициента $\varepsilon_{\text{инт}}$.

Исходные данные для расчетов:

- холодопроизводительность – 600 Вт;
- температура теплоносителя на входе в горячий теплообменный контур – 36°C;
- температура теплоносителя на входе в холодный теплообменный контур – 31°C;
- затраты теплоносителя в каждом контуре – 22 мл/с [8]/

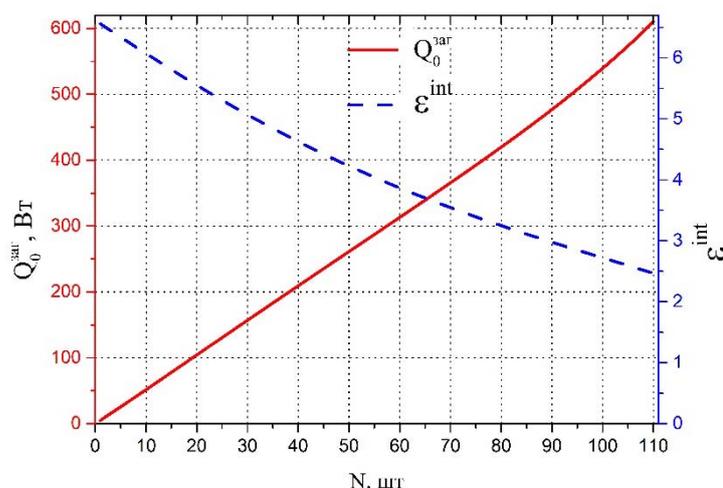


Рис. 2. Зависимость суммарной холодопроизводительности и интегрального холодильного коэффициента термоэлектрического теплового насоса от количества термоэлектрических модулей.

Таким образом, в результате моделирования определено количество термоэлектрических модулей для обеспечения необходимой холодопроизводительности $Q_0=600$ Вт, что составляет 110 штук. При этом все термоэлектрические модули работают при оптимальном токе питания, который обеспечивает достижение наивысшего значения интегрального холодильного коэффициента термоэлектрического теплового насоса на уровне $\epsilon_{\text{инт}} = 2.5$.

Сравнение полученных результатов с результатами предыдущих исследований термоэлектрического теплового насоса [9], свидетельствует о том, что предельное значение холодильного коэффициента ТТН превышает достигнутый на сегодняшний день уровень ($\epsilon = 1.85$) на 26%. Это позволяет сделать вывод о необходимости дальнейших исследований ТТН с целью приближения его эффективности к предельно возможным значениям.

Выводы

1. Рассчитана зависимость холодопроизводительности термоэлектрического теплового насоса от количества термоэлектрических модулей, каждый из которых работает при оптимальном токе питания. Для достижения холодопроизводительности $Q_0=600$ Вт необходимо 110 термоэлектрических модулей.
2. Установлено, что предельные значения интегрального холодильного коэффициенту термоэлектрического теплового насоса, при условиях питания каждого из термоэлектрических модулей оптимальным электрическим током и достижение холодопроизводительности $Q_0=600$ Вт, составляют $\epsilon_{\text{инт}} = 2.5$.
3. Сравнение полученных результатов с результатами предыдущих исследований термоэлектрического теплового насоса, свидетельствует о том, что предельное значение холодильного коэффициента ТТН превышает достигнутый на сегодняшний день уровень на 26%.

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. Michael V. Lurie. Modeling of Oil Product and Gas Pipeline Transportation, WILEY-VCH

Verlag Gmbh & Co. KgaA, Weinheim, 2008. – P. 214.

9. Анатычук Л.И., Розвер Ю.Ю., Прибыла А.В. Экспериментальное исследование термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость // Термоэлектричество. – 2017. – № 3. – С. 33 – 39.

Поступила в редакцию 04.08.2017

L.I. Anatyshuk^{1,2} *acad. National Academy of Sciences of Ukraine,*
A.V. Prybyla^{1,2} *Candidate Phys.-math. Sciences*

Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Naukystr, Chernivtsi, 58029, Ukraine;

e-mail: anatyshuk@gmail.com

²Yu. Fedkovych Chernivtsi National University, 2, Kotsiubynskyi str.,
Chernivtsi, 58000, Ukraine

LIMITING POSSIBILITIES OF THERMOELECTRIC LIQUID-LIQUID HEAT PUMPS

The paper presents the results of calculations of the limiting possibilities of thermoelectric liquid-liquid heat pumps, in particular, for their use as a high-performance heater for a space-purpose water purifying device. Bibl. 9, Fig. 2.

Key words: thermoelectric heat pump, efficiency, distiller.

References

1. Rozver Yu.Yu. (2003). Termoelektrychnyi kondytsioner dlia transportnykh zasobiv [Thermoelectric air-conditioner for vehicles]. *Termoelektryka – J. Thermoelectricity*, 2, 52 – 56 [in Ukrainian].
2. Anatyshuk L.I., Vikhor L.N., Rozver Yu.Yu. (2004). Issledovaniie kharakteristik termoelektricheskogo okhladitel'ia potokov zhidkosti ili gaza [Investigation on performance of thermoelectric cooler of liquid or gas flows]. *Termoelektryka - J. Thermoelectricity*, 1, 73 – 80 [in Russian].
3. Anatyshuk L.I., Sudzuki N., Rozver Yu.Yu. (2005). Termoelektrychnyi kondytsioner dlia prymishchen [Indoor thermoelectric air-conditioner]. *Termoelektryka - J. Thermoelectricity*, 3, 53 – 56 [in Ukrainian].
4. Rifert V.G., Usenko V.I., Barabash P.A., et al. (2011). Razrabotka i ispytaniie sistemy regeneratsii vody iz zhidkikh otkhodov zhiznedeiatel'nosti na bortu pilotiruiemykh kosmicheskikh apparatov s ispolzovaniem termoelektricheskogo teplovogo nasosa [Development and test of water regeneration system from liquid biowaste on board of manned spacecrafts with the use of thermoelectric heat pump]. *Termoelektryka - J. Thermoelectricity*, 2, 63 – 74 [in Russian].
5. Anatyshuk L.I., Barabash P.A., Rifert V.G., Rozver Yu.Yu., Usenko V.I., Cherkez R.G. (2013). Termoelektricheskii teplovoi nasos kak sredstvo povysheniia effektivnosti system ochistki vody pri kosmicheskikh polyotakh [Thermoelectric heat pump as a means of improving efficiency of

water purification systems on space missions]. *Termoelektryka - J. Thermoelectricity*, 6, 78 – 83 [in Russian].

6. Anatyчук L.I. (2001). Ratsionalnyie oblasti issledovaniia i primeneniia termoelektrichestva [Rational fields of investigations and applications of thermoelectricity]. *Termoelektrichestvo – J. Thermoelectricity*, 3 – 14 [in Russian].
7. Anatyчук L.I. (2007). Sovremennoie sostoiianiie i nekotoryie perspektivy termoelektrichestva [Current status and some prospects of thermoelectricity]. *Termoelektrichestvo – J. Thermoelectricity*, 2, 7 – 20 [in Russian].
8. Lurie Michael V. (2008). *Modeling of oil product and gas pipeline transportation*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
9. Anatyчук L.I., Rozver Yu.Yu., Prybyla A.V. (2017). Eksperymentalne doslidzhennia termoelektrychnoho tepolovoho nasosa ridyna-ridyna [Experimental study of thermoelectric liquid-liquid heat pump]. *Termoelektryka - J. Thermoelectricity*, 3, 33 – 39 [in Ukrainian].

Submitted 04.08.2017