

**Анатычук Л. И.^{1,2} ак. НАН Украины,
Прибыла А. В.^{1,2} канд. физ.-мат. наук,
Розвер Ю. Ю.¹**

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

²Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича,
ул. Коцюбинского 2, Черновцы, 58012, Украина
e-mail: anatyach@gmail.com

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТЕПЛОВОГО НАСОСА ЖИДКОСТЬ-ЖИДКОСТЬ

На основе спроектированной конструкции термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость изготовлен его экспериментальный образец и проведена серия испытаний. Осуществлены сравнение характеристик исследуемого термоэлектрического теплового насоса с его аналогами и с результатами компьютерного проектирования. Библ. 7, Рис. 3.

Ключевые слова: термоэлектрический тепловой насос, экспериментальное исследование, система регенерации воды.

Введение

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 работах [6, 7] приведены результаты компьютерного проектирования термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость. Путем многопараметрической компьютерной оптимизации определены конструктивные параметры термоэлектрического теплового насоса, которые обеспечивают наивысшие показатели его эффективности. Следующий этап этой работы – экспериментальное исследование полученной конструкции термоэлектрического теплового насоса.

Цель предлагаемой работы – экспериментальное подтверждение основных результатов компьютерного проектирования термоэлектрического теплового насоса в условиях приближенных к его реальной эксплуатации в качестве высокоэффективного нагревателя для

систем регенерации воды космического назначения.

Конструкция и условия эксплуатации ТТН

Исходя из требований, которые ставятся перед ТТН для системы регенерации воды космического назначения (таблица), было проведено его компьютерное проектирование и определена конструкция теплового насоса (рис. 1).

Таблица

Требования к ТТН

№	Параметр	Значение
1.	Электрическая мощность питания термоэлектрических модулей, Вт	300
2.	Температура теплоносителя на входе в горячий теплообменный контур, °С	36
3.	Температура теплоносителя на входе в холодный теплообменный контур, °С	31.5
4.	Гидравлическое сопротивление каждого из теплообменных контуров, атм	0.07
5.	Расход теплоносителя в каждом контуре, мл/с	22
6.	Материал для теплообменников, контактирующий с жидкостью	титан, нержавеющая сталь AISI 304

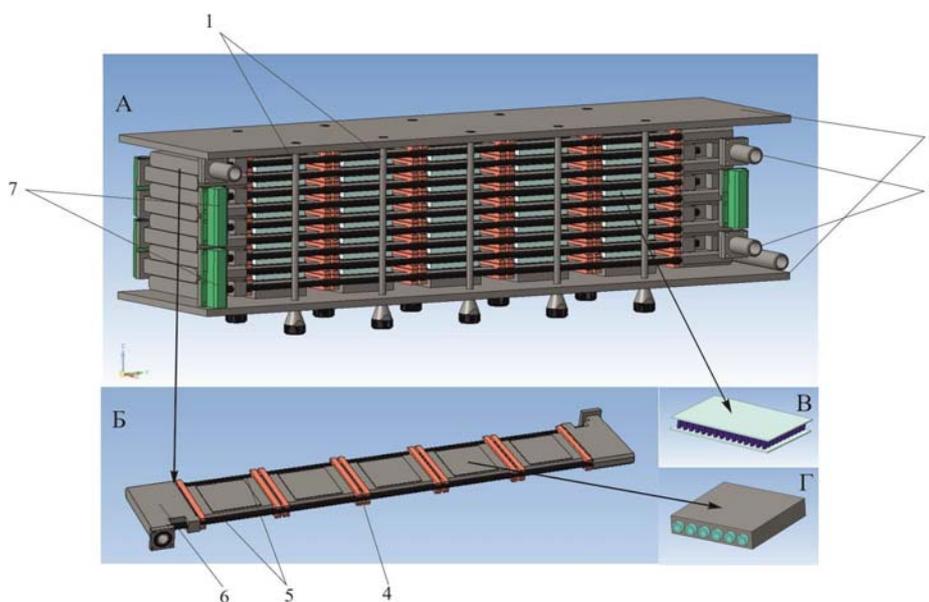


Рис. 1. Конструкция термоэлектрического теплового насоса жидкость-жидкость:

А – внешний вид, Б – схема коммутации одного ряда теплообменников, В – термоэлектрический модуль, Г – жидкостный теплообменник; 1 – вертикальные стяжки, 2 – детали корпуса, 3 – штуцеры, 4 – фиксаторы с прокладками, 5 – горизонтальные стяжки, 6 – коллекторы, 7 – переходники.

ТТН состоит из двух идентичных блоков, содержащих по 40 термоэлектрических модулей, и отличающихся лишь способом их электрического питания. Гидравлическая коммутация блоков ТТН осуществляется последовательно. Каждый блок состоит из жидкостных теплообменников (Г), что вместе с коллекторами (Б), горизонтальными стяжками (5) и фиксаторами (4) формируют ряды теплового насоса (Б). Между рядами теплового насоса находятся термоэлектрические модули (В). Соединение рядов осуществляется с помощью вертикальных стяжек (1) и переходников (7). На входах и выходах горячего и холодного контуров расположены штуцеры (3).

Внешний вид блоков ТТН приведено на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид блоков термоэлектрического теплового насоса.

Экспериментальное исследование ТТН

Измерение характеристик осуществлялось на специально созданном стенде. Схема измерительного стенда представлена на рис. 3. На схеме 1 и 2 – горячий и холодный термостаты, обеспечивающие движение теплоносителя соответствующей температуры по каналам теплового насоса (4, 5). Температуры теплоносителя на входе и выходе из ТТН фиксируются термопарами 3. Питание модулей первого 5 и второго 6 блоков ТТН осуществляется отдельными блоками питания 6.

Отдельно проведены измерения гидравлического давления в каналах термоэлектрического теплового насоса для обеспечения условий эксплуатации ТТН.

Тепловой поток, передаваемый термоэлектрическими модулями в горячий контур ТТН, определялся формулой (1):

$$Q_G = C \cdot G \cdot \Delta T_1, \quad (1)$$

где Q_G – теплопроизводительность, C – теплоемкость теплоносителя, G – расход теплоносителя, $\Delta T_1 = T_2 - T_1$ – разность температур между входом и выходом в горячий контур.

Отопительный коэффициент в таком случае определяется по формуле:

$$\mu = Q_G / W, \quad (2)$$

где W – электрическая мощность питания ТТН.

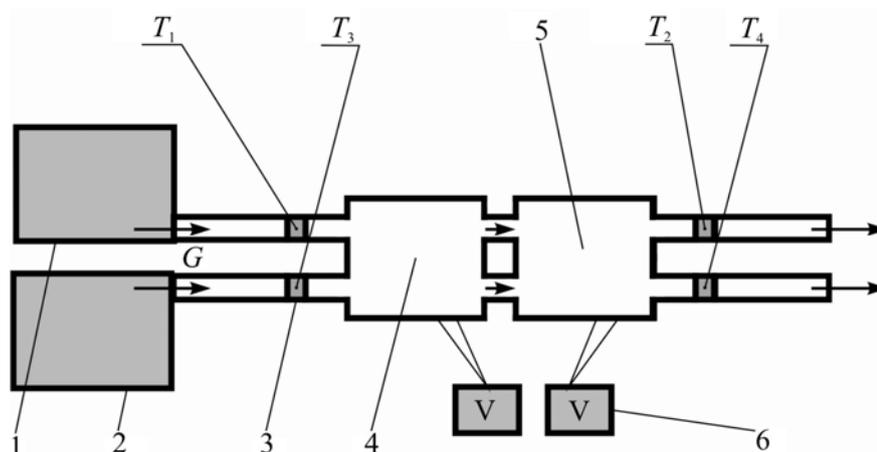


Рис.3. Схема измерительного стенда исследования ТТН:

1 – горячий термостат, 2 – холодный термостат,
 3 – комплект дифференциальных термопар с регистрирующим устройством, 4 – 1 блок ТТН, 5 – 2 блок ТТН,
 6 – блоки питания 1 и 2 блоков ТТН, T_1 – температура теплоносителя на входе в горячий контур ТТН, T_2 – температура теплоносителя на выходе из горячего контура ТТН, T_3 – температура теплоносителя на входе в холодный контур ТТН, T_4 – температура теплоносителя на выходе из холодного контура ТТН.

Для контроля теплового баланса в ТТН осуществлено также измерение холодопроизводительности и холодильного коэффициента ТТН в его холодном контуре по аналогичной методике:

$$Q_x = C \cdot G \cdot \Delta T_2, \quad (3)$$

где Q_x – холодопроизводительность, $\Delta T_2 = T_3 - T_4$ – разность температур между выходом и входом в холодный контур.

Холодильный коэффициент в таком случае определяется по формуле (4):

$$\varepsilon = Q_x / W, \quad (4)$$

Результаты измерения характеристик ТТН

Проведены исследования характеристик блоков ТТН отдельно для каждого из блоков, а также для случая двух блоков, которые гидравлически подключены последовательно, однако имеют индивидуальное питание.

Результаты измерения 1 блока:

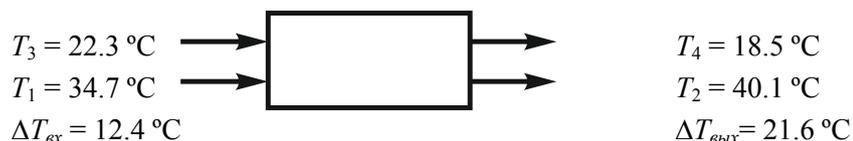


$$\Delta T_{\text{вх}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{вых}} = 12.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

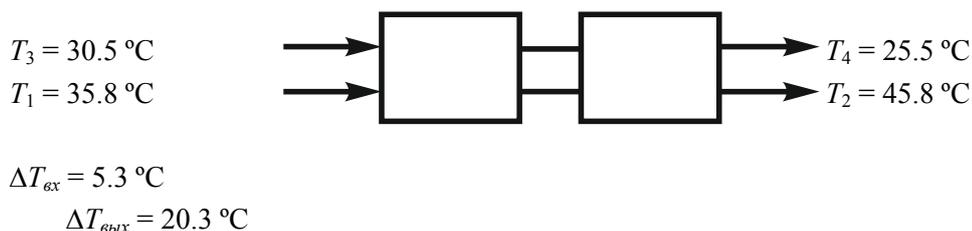
При следующих условиях питания термоэлектрических модулей – $U = 28 \text{ В}$, $I = 4.6 \text{ А}$, $W = 129 \text{ Вт}$, при расходе теплоносителя $G = 22.7 \text{ мл/с}$ и гидравлическом сопротивлении $\Delta p = 0.025 \text{ атм}$ теплопроизводительность первого блока ТТН составляет $Q_T = 429 \text{ Вт}$, а отопительный коэффициент $\mu = 3.3$.

Результаты измерения 2 блока:



При следующих условиях питания термоэлектрических модулей – $U = 27.9 \text{ В}$, $I = 6.7 \text{ А}$, $W = 186.9 \text{ Вт}$, при расходе теплоносителя $G = 22.2 \text{ мл/с}$ и гидравлическом сопротивлении $\Delta p = 0.025 \text{ атм}$ теплопроизводительность второго блока ТТН составляет $Q_T = 503.5 \text{ Вт}$, а отопительный коэффициент $\mu = 2.7$.

Результаты измерения двух блоков ТТН:



При следующих условиях питания термоэлектрических модулей – $U = 27.9 \text{ В}$, $I = 11.1 \text{ А}$, $W = 309 \text{ Вт}$, расходе теплоносителя $G = 21 \text{ мл/с}$ и гидравлическом сопротивлении $\Delta p = 0.05 \text{ атм}$ теплопроизводительность ТТН составляет $Q_T = 882 \text{ Вт}$, а отопительный коэффициент $\mu = 2.85$.

Из результатов измерений следует, что первый блок работает при меньшем перепаде температур на входе ($\Delta T_{\text{вх}} = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), что обуславливает большее значение отопительного коэффициента $\mu = 3.3$. Второй блок работает при перепаде температур на входе ($\Delta T_{\text{вх}} = 12.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$), что обуславливает значение отопительного коэффициента $\mu = 2.7$. Оптимизация блоков ТТН была осуществлена именно для этих конкретных интервалов температур, что позволило получить конечный отопительный коэффициент $\mu = 2.85$. Сравнение полученных результатов с характеристиками ТТН, разработанных ранее [4, 5], свидетельствует о преимуществах разработанной конструкции ТТН на 10 – 15 %.

Кроме того, осуществлена оценка расхождения между результатами компьютерного моделирования, полученных в работах [6, 7] и результатами экспериментальных исследований, выполненных в данной работе. Установлено, что по отопительному коэффициенту результаты экспериментальных исследований на $\sim 7 \text{ } \%$ ниже результатов компьютерного моделирования.

Выводы

1. Проведено экспериментальное исследование характеристик ТТН и определены его

теплопроизводительность $Q_T = 882$ Вт и отопительный коэффициент $\mu = 2.85$ в условиях, приближенных к условиям его реальной эксплуатации в качестве высокоэффективного нагревателя для систем регенерации воды космического назначения.

2. Осуществлена оценка расхождения между результатами компьютерного моделирования полученными в работах [6, 7] и результатами экспериментальных исследований. Это расхождение составляет $\sim 7\%$.
3. Сравнение полученных результатов с характеристиками ТТН, разработанных ранее [4, 5], свидетельствуют о преимуществах разработанной конструкции ТТН по отопительному коэффициенту на 10 – 15 %.

Литература

1. Розвер Ю. Ю. Термоэлектрический кондиционер для транспортных средств / Ю. Ю. Розвер. // Термоэлектричество. – № 2. – 2003. – С. 71 – 74.
2. Анатычук Л. И. Исследование характеристик термоэлектрического охладителя потоков жидкости или газа / Л. И. Анатычук, Л. Н. Вихор, Ю. Ю. Розвер. // Термоэлектричество. – 2004. – №1. – С. 73 – 80.
3. Анатычук Л. И. Термоэлектрический кондиционер для помещений / Л. И. Анатычук, Н. Сузуки, Ю. Ю. Розвер. // 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 / Л. И. Анатычук, П. А. Барабаш, В. Г. Риферт, Ю. Ю. Розвер [и др.] // Термоэлектричество. – 2013. – № 6. – С. 78 – 83.
6. Анатычук Л. И., Прибыла А. В. Оптимизация тепловой коммутации в термоэлектрических тепловых насосах жидкость – жидкость для приборов очистки воды космического назначения / Л. И. Анатычук, А. В. Прибыла. // Термоэлектричество. – 2015. – № 4. – С. 45 – 51.
7. Анатычук Л. И., Прибыла А. В. Оптимизация системы питания термоэлектрического теплового насоса системы жидкость-жидкость / Л. И. Анатычук, А. В. Прибыла. // Термоэлектричество. – 2015. – № 6. – С. 59 – 64.

Поступила в редакцию 20.07.2017

L. I. Anatyчук^{1,2} *acad. National Academy of Sciences of Ukraine,*
A. V. Prybyla^{1,2} *Candidate Phys.-math. Sciences,*
Yu. Yu. Rozver¹

¹Institute of Thermoelectricity of the NAS and MES of Ukraine,
1, Nauky str., Chernivtsi, 58029, Ukraine e-mail: anatyuch@gmail.com;

²Yu.Fedkovych Chernivtsi National University,
2, Kotsiubynskyi str., Chernivtsi, 58000, Ukraine
e-mail: anatyuch@gmail.com

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMOELECTRIC LIQUID-LIQUID HEAT PUMP

Based on the elaborated design of thermoelectric liquid-liquid heat pump, its experimental prototype was manufactured and a series of tests was performed. The characteristics of thermoelectric heat pump under study were compared to its analogs and the results of computer design. Bibl. 7, Fig. 3.

Key words: thermoelectric heat pump, experimental study, water recovery system.

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. Anatyuchuk 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. Anatyuchuk 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 zhiznediel'telnosti 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. Anatyuchuk 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. Anatyuchuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optimizatsiia teplovoi kommutatsii v termoelektricheskikh teplovykh nasosakh zhidkost-zhidkost dlia priborov ochistki vody kosmicheskogo naznacheniia [Optimization of thermal connections in liquid-liquid thermoelectric heat pumps for water purification devices of space application]. *Termoelektryka - J.Thermoelectricity*, 4, 45 – 51 [in Russian].
7. Anatyuchuk L.I., Prybyla A.V. (2015). Optymizatsiia systemy zhyvlenniia termoelektrychnoho teplovoho nasosa ridyna- ridyna [Optimization of power supply system of thermoelectric liquid-liquid heat pump]. *Termoelektryka - J.Thermoelectricity*, 6, 53 – 58 [in Ukrainian].

Submitted 20.07.2017