

EDN: QILHGR

УДК 536.248.2

Experimental Study of Two-Phase Thermosyphons of the Thermoelectric Cooling Unit

Evgeniy N. Vasil'ev*,
Dmitriy P. Emel'yanov and Denis A. Nesterov
*Institute of Computational Modelling SB RAS
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 06.06.2023, received in revised form 10.08.2023, accepted 22.09.2023

Abstract. Experimental studies of the heat transfer capacity of two-phase thermosyphons filled with Freon 134A have been carried out. Thermosyphons are made of stainless steel, have a length of 400 mm and an internal diameter of 10.5 mm, the length of the evaporation zone was 200 mm, and the length of the condenser was 60 mm. The data of measurements of the temperature state and heat transfer characteristics of thermosyphons depending on the transferred heat flux, the angle of inclination from the vertical and the temperature of the coolant of the heat removal system are given.

Keywords: two-phase thermosyphon, heat flow, thermal resistance, angle of inclination.

Citation: Vasil'ev E.N., Emel'yanov D.P., Nesterov D. A. Experimental study of two-phase thermosyphons of the thermoelectric cooling unit. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(8), 904–911. EDN: QILHGR



Экспериментальное исследование двухфазных термосифонов термоэлектрического блока охлаждения

Е. Н. Васильев, Д. П. Емельянов, Д. А. Нестеров
Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, Красноярск

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования теплопередающей способности двухфазных термосифонов, заправленных фреоном 134А. Термосифоны изготовлены из нержавеющей стали, имеют длину 400 мм и внутренний диаметр 10,5 мм, протяженность зоны испарения составляла 200 мм, а длина конденсатора – 60 мм. Приведены данные измерений температурного состояния и теплопередающих характеристик термосифонов в зависимости от передаваемого теплового потока, угла наклона от вертикали и температуры теплоносителя системы теплоотвода.

Ключевые слова: двухфазный термосифон, тепловой поток, термическое сопротивление, угол наклона.

Цитирование: Васильев Е. Н. Экспериментальное исследование двухфазных термосифонов термоэлектрического блока охлаждения / Е. Н. Васильев, Д. П. Емельянов, Д. А. Нестеров // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(8). С. 904–911. EDN: QILHGR

Введение

Термосифоны известны как высокоэффективные пассивные двухфазные теплопередающие устройства, в которых для интенсификации теплопереноса используются процессы испарения и конденсации. Они способны передавать теплоту на относительно большие расстояния с небольшой разницей температур между зонами подвода и отвода тепла. Термосифоны зарекомендовали себя как недорогие и надежные устройства для применения в системах теплоотвода и терморегулирования в различных практических приложениях. В конструкции термоэлектрического блока охлаждения [1, 2], предназначенного для судовых холодильных установок, термосифоны являются составной частью воздушного теплообменника. Использование термосифонов обеспечивает возможность существенного увеличения поверхности теплообменника, снижение величины термического сопротивления при теплопередаче от ребер к холодному спаю термоэлектрических модулей (ТЭМ). Также термосифоны препятствуют возникновению обратного потока теплоты при выключении электропитания блока, которое периодически производится для оттаивания инея и удаления воды с поверхности ребер. Эффективность работы термоэлектрического блока зависит от термического сопротивления теплообменников, входящих в конструкцию блока [3]. В работе [4] проведен анализ характеристик термоэлектрического блока, который показал, что наибольшее влияние на его холодопроизводительность и холодильный коэффициент оказывает величина термического сопротивления воздушного теплообменника R_T . Поэтому определение теплопередающей способности термосифонов, непосредственно влияющей на величину R_T , является актуальной задачей.

Теплопередающие характеристики термосифонов зависят от различных факторов. Это, прежде всего, количество заправленного теплоносителя и его теплофизические свойства, общая длина, внутренний диаметр, длины зон нагрева (испарения) и конденсации, а также условия охлаждения зоны конденсации [5, 6]. Кроме того, для обеспечения свободного стекания воды при периодическом оттаивании теплообменника для удаления инея с поверхности ребер предусматривается такое расположение термоэлектрического блока, при котором термосифоны наклонены на некоторый угол от вертикали [7]. Для прогнозирования работы термоэлектрического блока в различных режимах необходимо определить теплопередающие характеристики термосифонов и их зависимость от ряда факторов. В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования термосифонов для условий, характерных для воздушного теплообменника термоэлектрического блока охлаждения.

Описание термосифонов и экспериментальной установки

Конструкция термоэлектрического блока охлаждения содержит в себе восемь термоэлектрических модулей. К каждому термоэлектрическому модулю присоединены секции из трех термосифонов, ребра теплообменника выполнены в виде прямоугольных пластин, которые нанизаны на все термосифоны термоэлектрического блока [7, 8]. Такая конструкция повышает надежность работы блока охлаждения, выход из строя или разгерметизация одного из термосифонов не приведет к значительному снижению эффективности охлаждения. Термосифоны каждой отдельной секции впаяны в медную пластину, выполняющую функцию конденсатора и теплораспределителя (рис. 1). Боковой поверхностью медная пластина прикреплена к холодной стороне термоэлектрического модуля. Корпуса термосифонов представляют собой трубку, изготовленную из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Длина трубки 400 мм, внутренний диаметр 10,5 мм и толщина стенки 0,4 мм. В качестве рабочей жидкости использовался фреон 134А, степень заполнения внутреннего объема составляет 60 %.

Исследование характеристик термосифонов проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 2. Установка включает в себя одну секцию, состоящую из трех термосифонов 1, впаянных в цилиндрические отверстия медной пластины 2, теплота к термосифонам подводится с помощью нагревателей 3. Отвод теплоты осуществляется жидкостным теплообменником, который прикреплен к боковой поверхности медной пластины и подключен к термостату 4. В качестве нагревателей использована нихромовая проволока, намотанная через изоляционную пленку на корпус термосифонов и подключенная к стабилизированному блоку питания 5. Система измерения температуры включала в себя 14 термопар 6, размещенных на термосифонах и поверхности медной пластины, контактирующей с жидкостным теплооб-



Рис. 1. Общий вид секции из трех термосифонов и общего конденсатора

Fig. 1. General view of a section of three thermosyphons and a common condenser

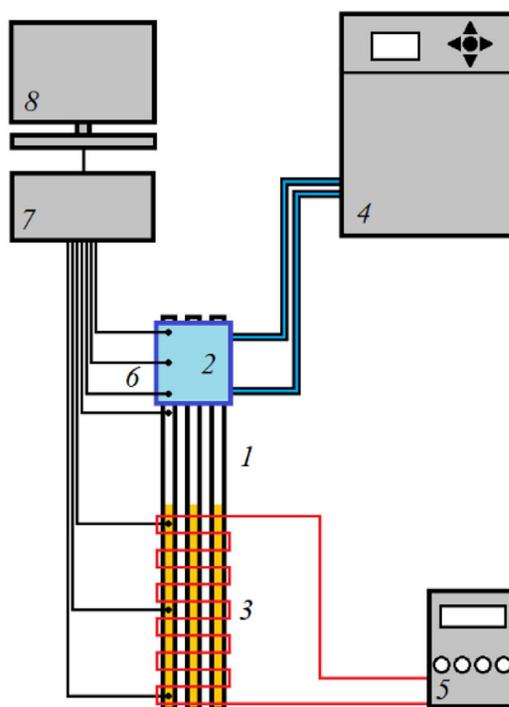


Рис. 2. Схема экспериментальной установки. 1 – термосифоны, 2 – конденсатор, 3 – нагреватель, 4 – термостат, 5 – источник электропитания, 6 – термопары, 7 – модуль измерительной системы, 8 – компьютер

Fig. 2. Diagram of the experimental setup. 1 – thermosiphons, 2 – condenser, 3 – heater, 4 – thermostat, 5 – power supply, 6 – thermocouples, 7 – measuring system module, 8 – computer

менником. Регистрация значений температуры производилась автоматизированным вычислительным комплексом на базе модульной измерительной системы LTR (производства L-CARD) 7 и персонального компьютера 8. При проведении экспериментов секция полностью укрывалась теплоизоляционным материалом.

Одним из главных критериев теплопередающей способности термосифонов является величина термического сопротивления R , которое зависит от передаваемой тепловой мощности Q и других факторов. Эффективное общее тепловое сопротивление термосифона определяется в виде

$$R = \frac{T_e - T_c}{Q}, \quad (1)$$

здесь T_e и T_c – средние значения температуры в зонах испарения и конденсации, в которых производится подвод и отвод теплоты соответственно.

Измерения температуры проводились термопарами, схема их расположения приведена на рис. 3. В зоне испарения и подвода теплоты расположены три термопары с номерами 5, 6 и 7, которые располагаются на поверхности термосифона между нитями нагревателя и крепятся непосредственно к поверхности термосифона. Еще одна термопара 4 прикреплена к поверхности термосифона вблизи конденсатора. Термопары 1, 2 и 3 измеряют температуру в зоне конденсации и отвода теплоты, причем эти термопары находятся не на поверхности термосифона, а в углублениях дополнительной латунной пластины вровень с поверхностью, контактирующей с конденсатором. В данном случае показания этих термопар учитывают влияние

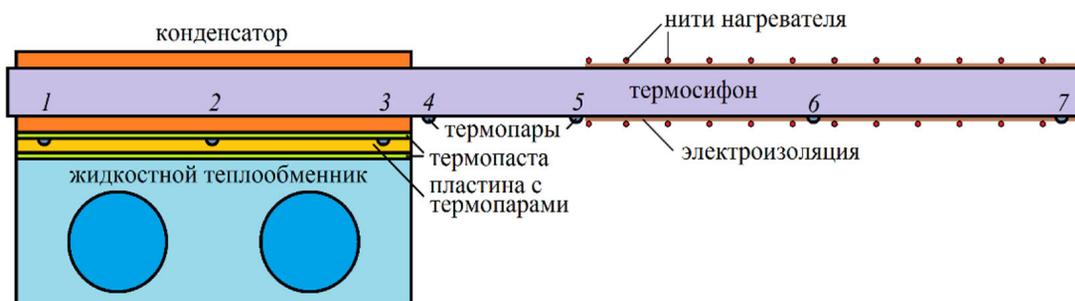


Рис. 3. Схема расположения термопар для измерения значений температуры в секции термосифонов

Fig. 3. Diagram of thermocouples for measuring temperature values in the thermosiphon section

термических сопротивлений в слое конденсата внутри термосифона и стенки трубки, а также дополнительно термические сопротивления конденсатора и слоя термопасты. Таким образом, применительно к термоэлектрическому блоку можно определить полное термическое сопротивление секции термосифонов, которая обеспечивает теплопередачу от ребер воздушного радиатора на поверхность холодной стороны ТЭМ. Более подробные измерения с помощью 7 термопар проводились на одном из крайних термосифонов секции, на других термосифонах для контроля их теплопередающих характеристик располагалось по три термопары.

Обсуждение результатов измерений

На теплопередающие характеристики термосифонов влияют различные факторы. Это, прежде всего, количество заправленного теплоносителя и его теплофизические свойства, общая длина, внутренний диаметр, длины зон нагрева и конденсации, условия охлаждения зоны конденсации. Предварительно было установлено оптимальное количество заправленного теплоносителя – 60 % от внутреннего объема. Далее были проведены экспериментальные исследования при тепловой мощности $Q = 5, 10, 20$ и 40 Вт, передаваемой одним термосифоном; температуре теплоносителя в контуре жидкостного теплообменника $T_0 = 5, -5, -15$ и -25 °С; угле отклонения термосифона от вертикали $\alpha = 0, 15, 30$ и 45° .

Фиксация данных измерений проводилась после выхода температур на установившийся режим. Характерное распределение значений температуры по длине термосифона приведено на рис. 4, данные значения получены при угле наклона $\alpha = 15^\circ$ и температуре теплоносителя в контуре жидкостного теплообменника $T_0 = -15$ °С, на кривых указаны соответствующие значения тепловой мощности. Температура в зоне испарения термосифона, где установлен нагреватель, выше, чем в устройстве теплоотвода, контактирующем с областью конденсации. При этом следует отметить, что в области теплоотвода наблюдается температурный градиент противоположного знака, что, по-видимому, связано с зависимостью характеристик процесса конденсации и теплопередачи от координаты. Наибольший перепад температуры, определяемый показаниями термопар 4 и 5, наблюдается на адиабатном участке термосифона, особенно заметно этот эффект проявляется с ростом тепловой мощности.

Значения термического сопротивления термосифона рассчитывались по формуле (1), при этом значение T_e определялось как среднее арифметическое показаний термопар 5, 6 и 7, а T_c

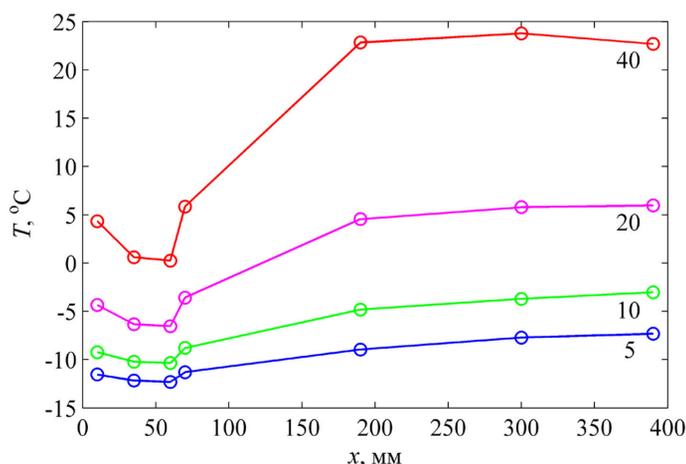


Рис. 4. Распределение температуры по длине термосифона

Fig. 4. Temperature distribution along the length of the thermosiphon

аналогичным образом рассчитывалось по показаниям термопар 1, 2 и 3. Полученные значения термических сопротивлений термосифона приведены в табл. 1 для всего диапазона тепловой мощности, температур теплоносителя в контуре жидкостного теплообменника и углов отклонения термосифона от вертикали.

Таблица 1. Экспериментальные значения термического сопротивления термосифона в зависимости от передаваемой тепловой мощности Q , температуры теплоносителя T_0 и угла наклона α Table 1. Experimental values of the thermal resistance of a thermosiphon depending on the transferred thermal power Q , coolant temperature T_0 , and slope angle α

$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha, ^\circ$	$R (Q = 5 \text{ Вт})$	$R (Q = 10 \text{ Вт})$	$R (Q = 20 \text{ Вт})$	$R (Q = 40 \text{ Вт})$
5	0	0,69	0,56	0,53	0,56
	15	0,63	0,53	0,51	0,53
	30	0,66	0,54	0,51	0,53
	45	0,75	0,56	0,52	0,51
-5	0	0,73	0,59	0,55	0,57
	15	0,82	0,61	0,53	0,53
	30	0,72	0,59	0,52	0,53
	45	0,72	0,57	0,50	0,51
-15	0	0,72	0,61	0,55	0,56
	15	0,75	0,6	0,54	0,54
	30	0,75	0,62	0,55	0,53
	45	0,74	0,59	0,54	0,52
-25	0	0,78	0,62	0,57	0,57
	15	0,79	0,63	0,57	0,54
	30	0,80	0,64	0,56	0,53
	45	0,81	0,62	0,57	0,52

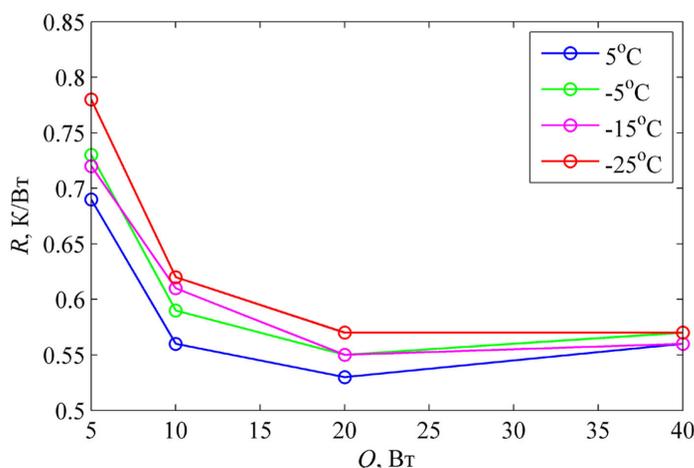


Рис. 5. Зависимости термического сопротивления термосифона от тепловой мощности для различных значений температуры теплоносителя

Fig. 5. Dependences of the thermal resistance of the thermosiphon on the thermal power for different values of the coolant temperature

Наиболее выраженной особенностью приведенных экспериментальных данных является зависимость термического сопротивления от тепловой мощности. На рис. 5 приведены зависимости $R(Q)$ для различных значений температуры теплоносителя в жидкостном теплообменнике при угле наклона $\alpha = 0$. При росте тепловой мощности до 20 Вт термическое сопротивление R снижается, при дальнейшем росте происходит его стабилизация, а при значениях $T_0 = 5$ и -5 °C наблюдается даже увеличение термического сопротивления. Это увеличение, по-видимому, связано прежде всего с ростом внутреннего термического сопротивления в зоне конденсации. В этой зоне, как видно на рис. 4, наблюдается существенный рост температурного перепада, который может быть обусловлен дополнительным увеличением толщины пленки конденсата на внутренней поверхности термосифона из-за уменьшения скорости стекания жидкости вследствие воздействия пара, движущегося в противоположном направлении. Менее выраженными являются зависимости термического сопротивления от температуры теплоносителя и угла наклона термосифона. Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 1, в целом свидетельствует об определенных тенденциях снижения термического сопротивления при увеличении температуры теплоносителя и угла наклона термосифона.

Заключение

В результате экспериментального исследования определены температурные распределения по длине термосифона и рассчитаны значения общего термического сопротивления. Установлена степень влияния тепловой мощности, температуры теплоносителя и угла наклона на теплопередающую способность термосифона. В характерном для термоэлектрического блока диапазоне тепловой мощности 10–40 Вт, приходящейся на один термосифон, величина термического сопротивления отдельной секции из трех термосифонов составляет 0,17–0,21 К/Вт в зависимости от температуры теплоносителя в жидкостном теплообменнике и угла наклона.

Список литературы / References

- [1] Патент 2511922 (РФ) от 10.04.14 г, МПК F25B 21/02. Термоэлектрический блок охлаждения / Деревянко В. А., Гладущенко В. Н., Гейнц Э. Р., Коков Е. Г., Васильев Е. Н., Руссков В. В. [Patent 2511922 (RF), dated 10.04.14, МПК F25B 21/02. Thermoelectric cooling unit. / Derevjanko V. A., Gladushchenko V. N., Gejnts E. R., Kokov E. G., Vasil'ev E. N., Russkov V. V. (in Rus.)]
- [2] Васильев Е. Н., Гейнц Э. Р., Деревянко В. А., Коков Е. Г., Кукушкин С. В. Термоэлектрический блок охлаждения. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2019, 12(2), 146–152 [Vasil'ev E. N., Gejnts E. R., Derevyanko V. A., Kokov E. G., Kukushkin S. V. Thermoelectric cooling block, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2019, 12(2), 146–152 (in Rus.)]
- [3] Васильев Е. Н. Влияние термических сопротивлений на холодильный коэффициент термоэлектрической системы охлаждения. *Журнал технической физики*, 2021, 91(5), 743–747 [Vasil'ev E. N. Effect of thermal resistances on the coefficient of performance of a thermoelectric cooling system. *Technical Physics*, 2021, 66(5), 720–724]
- [4] Васильев Е. Н. Расчет и оптимизация теплообменников термоэлектрического блока охлаждения. *Теплофизика и аэромеханика*, 2022, 29(3), 419–429 [Vasil'ev E. N. Calculation and optimization of heat exchangers for thermoelectric cooling unit. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2022, 29(3), 401–410]
- [5] Faghri A. *Heat Pipe. Science and Technology*. Taylor and Francis, London, 1995. 874.
- [6] Reay D., Kew, P. *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*. Butterworth Heinemann, Oxford, Fifth Edition, 2006. 378.
- [7] Васильев Е. Н., Емельянов Д. П. Влияние угла наклона щелевого канала на стекание воды. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2022. 15(5). 526–533 [Vasil'ev E. N., Emel'yanov D. P. The Effect of the Tilt Angle of the Slot Channel on Water Runoff. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2022, 15(5), 526–533 (in Rus.)]
- [8] Васильев Е. Н., Емельянов Д. П., Нестеров Д. А. Экспериментальное исследование инееобразования в пластинчатом теплообменнике. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2022. 15(1). 24–34 [Vasil'ev E. N., Emel'yanov D. P., Nesterov D. A. Experimental Study of Frost Formation in a Plate Heat Exchanger. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2022, 15(1), 24–34 (in Rus.)]