

УДК 536.24

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕРМОСИФОННОМ ЭЛЕМЕНТЕ С ОРЕБРЕННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ КОНДЕНСАТОРА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ УСЛОВИЙ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТА В ПРОСТРАНСТВЕ

**А. В. ШАПОВАЛОВ, Н. М. КИДУН,  
Т. Н. НИКУЛИНА, В. В. ЧЕРНЯВСКАЯ**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

*Представлены результаты экспериментального исследования работы замкнутых двухфазных теплопередающих устройств, заполненных водой. Проведены эксперименты при углах наклона устройства (0°, 45°, 90°), что увеличивает область применения таких теплообменных элементов в промышленности. Диапазон подводимых тепловых потоков – 240–610 Вт. Установлена зависимость термического сопротивления от подводимой тепловой нагрузки классического термосифона с гладкой поверхностью конденсатора и с оребренной поверхностью конденсатора, проведен анализ полученных результатов.*

**Ключевые слова:** термосифон, энергосберегающая технология, термическое сопротивление, интенсификация теплообмена, модификация поверхностей теплообмена.

## RERESULTS OF THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF HEAT EXCHANGE IN THE THERMOSYPHON ELEMENT WITH RIBBED SURFACE CAPACITOR WHEN CONDITIONS CHANGE POSITION OF THE ELEMENT IN SPACE

**V. M. SHAPOVALOV, N. M. KIDUN,  
T. N. NIKULINA, V. V. CHERNYAVSKAYA**

*Educational Institution “Sukhoi State Technical University  
of Gomel”, the Republic of Belarus*

*The authors present the results of an experimental research of the operation of closed two-phase thermosiphon systems filled with water. Experiments were carried out at the inclination angles of the device (0°, 45°, 90°), which increases the field of application of such heat exchange elements in industry. The range of supplied heat fluxes is 240–610 W. The article shows dependence of thermal resistance on supplied thermal load of classical thermosiphon with smooth surface of condenser and with finned surface of condenser was established, analysis of obtained results.*

**Keywords:** thermosiphon, energy-saving technology, thermal resistance, heat transfer intensification, modification of heat exchange surfaces.

### **Введение**

Замкнутые двухфазные термосифоны многими авторами [1–3] рассматриваются как достаточно перспективные, надежные теплопередающие теплообменные устройства за счет автономности, конструкционной гибкости, отсутствия движущихся частей, высокой интенсивности внутренних процессов теплопереноса, отсутствия насосов для перекачки теплоносителя и др. [4].

В настоящее время еще недостаточно изучена физика процессов, протекающих в термосифонах. Помимо этого накопленные знания в данной области представляют собой, как правило, выводы, полученные для конкретных вариантов термосифонов и теплоносителей, конструктивных схем и технических решений [5–8].

Следует отметить, что наиболее значимой характеристикой работы термосифона является его термическое сопротивление, на которое можно повлиять, используя эффективные способы интенсификации теплообмена.

Различные способы интенсификации [9, 10] теплообмена разработаны и исследованы в неодинаковой степени, лишь часть из них доведена до уровня промышленного использования. Общие физические принципы, объясняющие возможность получения положительного эффекта в случае их применения, известны давно, однако зависимости для расчета теплообмена при изменении геометрических параметров интенсификаторов теплообмена в различных условиях определены далеко не в полной мере.

Целью работы является получение экспериментальных данных исследования работы эффективных двухфазных замкнутых теплопередающих систем с развитой поверхностью конденсатора, заправленных модельной жидкостью – дистиллированной водой при разных углах наклона устройства к горизонту; определение эффективности использования оребрения поверхности конденсатора для снижения термического сопротивления термосифона.

#### **Описание установки и методика эксперимента**

На кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» ГГТУ им. П. О. Сухого проводятся экспериментальные исследования работы замкнутых двухфазных теплопередающих устройств. Создан экспериментальный стенд, разработана методика исследования работы двухфазных пародинамических термосифонов с внутренними кольцевыми вставками и термосифонов классической конструкции без внутренних циркуляционных вставок, заправленных разными теплоносителями (дистиллированной водой, R134a, R404A, R407C, R410A). Подробно результаты экспериментов представлены в [11, 12].

Для снижения термического сопротивления экспериментального образца были определены варианты модернизации установки. На основании литературного обзора существующих методов интенсификации теплообмена теплопередающих поверхностей было выбрано два мероприятия по улучшению теплообмена:

а) в зоне парообразования (испарителя) улучшение гидродинамических характеристик достигнуто за счет изменения размера парового канала;

б) в зоне конденсации для развития теплопередающей поверхности использовано наружное поперечное оребрение поверхности конденсатора (рис. 1). Из листа латуни толщиной 15 мм при помощи лазерной резки было вырезано 202 кольца, после чего кольца были припаяны на конденсатор. Шаг оребрения выбран 2 мм, высота ребер 1,6 см.



Рис. 1. Развитая теплопередающая поверхность конденсатора термосифона

### Экспериментальные данные

Проведена серия экспериментальных исследований для определения распределения температур стенки испарителя и конденсатора термосифона при разных подводимых тепловых нагрузках к испарителю термосифона. Условия проводимых экспериментов:

- объем заправляемой жидкости – 500 мл (1/2 объема испарителя);
- угол наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости –  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ;
- подводимая тепловая нагрузка к испарителю – 240–610 Вт.

На рис. 2 представлены графики распределения температур по длине термосифона для различного положения устройства (угол наклона –  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Отрезок на графике с изменением длины от 0 до 900 мм относится к зоне испарения термосифона, отрезок от 1600 до 2500 мм – к зоне конденсации.

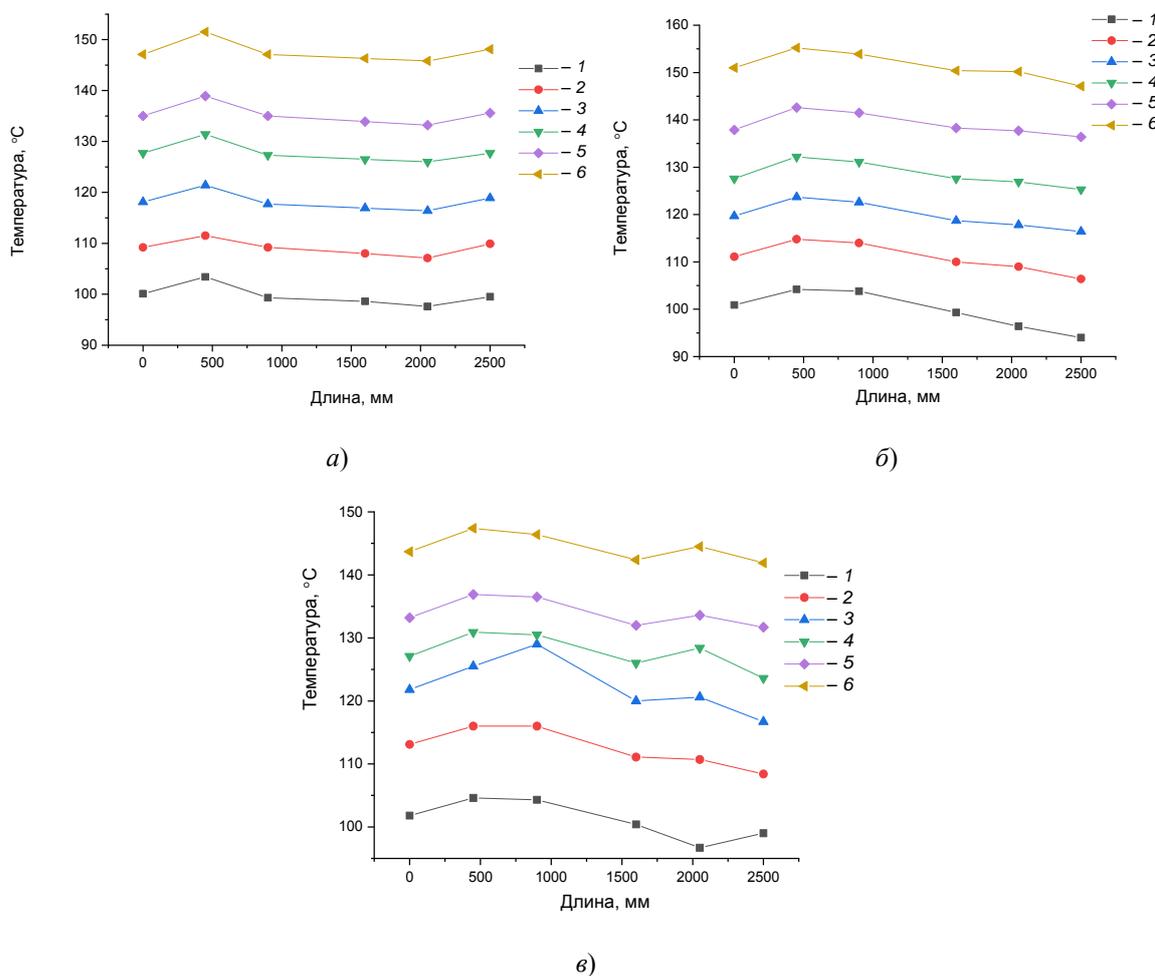


Рис. 2. Изменение температуры стенки термосифона по длине для наиболее стабильных режимов работы при различной подводимой нагрузке: теплоноситель – вода, объем заправки – 500 мл, угол наклона термосифона: а)  $0^\circ$ ; б)  $45^\circ$ ; в)  $90^\circ$ : 1 –  $Q = 316,8$  Вт; 2 –  $Q = 367,5$  Вт; 3 –  $Q = 425,6$  Вт; 4 –  $Q = 480$  Вт; 5 –  $Q = 541,8$  Вт; 6 –  $Q = 603$  Вт

Установлено, что ярко выраженного различия в изменении температуры в зависимости от углов наклона относительно горизонтальной плоскости не отмечено (рис. 3). Следовательно, можно говорить о стабильности работы термосифона независимо от положения в пространстве.

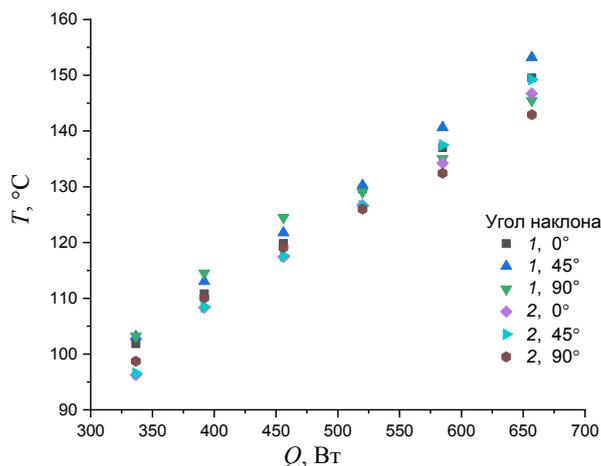


Рис. 3. Сравнение средних температур испарителя и конденсатора в зависимости от подводимой нагрузки  $Q$  и угла наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости (теплоноситель – вода, объем заправки – 500 мл):  
1 – испаритель; 2 – конденсатор

Для оценки эффективности применения использованных методов интенсификации теплообмена проводилось сравнение термического сопротивления термосифона с развитой теплопередающей поверхностью конденсатора (рис. 4, а) и термосифона с гладкой поверхностью конденсатора (рис. 4, б). При увеличении подводимой нагрузки термическое сопротивление термосифона с развитой теплопередающей поверхностью конденсатора уменьшается в 2–4 раза. На основании полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что созданная модель замкнутой двухфазной теплопередающей системы эффективнее аналогичного термосифона с гладкой поверхностью конденсатора.

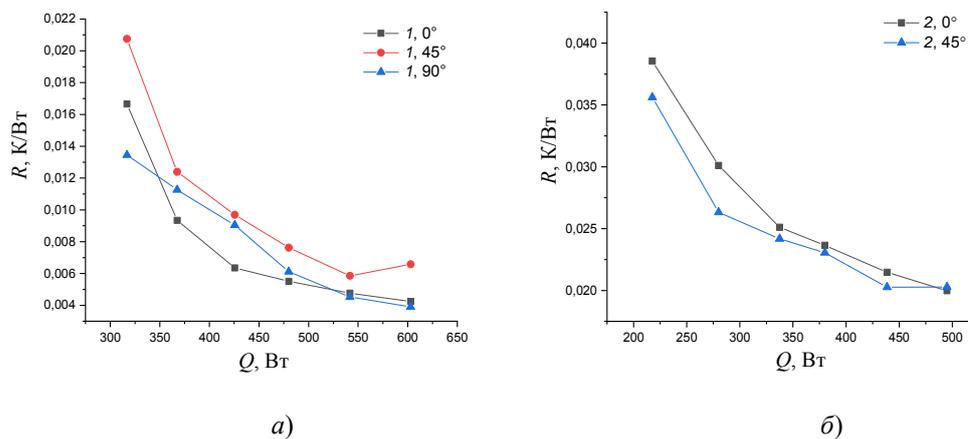


Рис. 4. Термическое сопротивление в зависимости от подводимой тепловой нагрузки при различных углах наклона:  
а – термосифон с оребренной поверхностью конденсатора;  
б – термосифон с гладкой поверхностью конденсатора

Увеличенное термическое сопротивление в пределах нагрузок до 370 Вт можно объяснить тем, что в данном диапазоне не достигнуты оптимальные параметры работы, и объема пара, образующегося при кипении жидкости, недостаточно для организации стабильной циркуляции теплоносителя, поэтому происходит быстрое охлаждение пара и не хватает движущей силы для проталкивания конденсата.

### Заключение

На основании анализа экспериментальных данных можно сделать следующие выводы:

- распределение температур теплоносителя по длине термосифона не зависит от угла наклона относительно плоскости;
- влияние угла наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости при объеме заправки 500 мл и использовании модельной жидкости в качестве теплоносителя оказывает влияние на термическое сопротивление термосифона в интервале нагрузок до 370 Вт;
- созданная модель замкнутой двухфазной теплопередающей системы эффективнее аналогичного термосифона с гладкой поверхностью конденсатора.

### Литература

1. Пародинамические термосифоны и их применение в тепловом оборудовании различного назначения / Леонард Л. Васильев [и др.] // Тепло- и массоперенос – 2013 : сб. науч. тр. – Минск, 2014. – С. 12–16.
2. Безродный, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк. – Киев : Факт, 2005. – 704 с.
3. Накоряков, В. Е. Теплообмен при фазовых переходах и химических превращениях в микроканальных системах / В. Е. Накоряков, В. В. Кузнецов // Труды 4-й РНКТ/ РАН, МЭИ. – М., 2006. – Т. 1. – С. 33–37.
4. Шаповалов, А. В. Результаты экспериментального исследования пародинамического термосифона / А. В. Шаповалов, А. В. Родин, Р. Н. Жихарев // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2015. – № 3. – С. 58–64.
5. Noie, S. H. Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon / S. H. Noie // Appl Therm Eng. – 2005. – Vol. 25. – P. 495–506.
6. Кузнецов, Г. В. Режимы смешанной конвекции в замкнутом двухфазном термосифоне цилиндрической формы / Г. В. Кузнецов, М. А. Аль-Ани, М. А. Шеремет // Изв. ТПУ. – 2011. – Т. 318, № 4. – С. 18–23.
7. Niro, A. Boiling regimes in a closed two-phase thermosyphon / A. Niro, G. P. Beretta // Int. Journal of Heat and Mass Transfer. – 1990. – Vol. 33. – P. 2099–2110.
8. Jouhara, H. Experimental investigation of small diameter two-phase closed thermosyphons charged with water, FC-84, FC-77 and FC-3283 / H. Jouhara, A. J. Robinson // Applied Thermal Engineering. – 2010. – Vol. 30. – P. 201–211.
9. Бессонный, А. Н. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушно-го охлаждения : справочник / А. Н. Бессонный, Г. А. Дрейцер, В. Б. Кунтыш // под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессоного. – СПб. : Недра, 1996. – 512 с.
10. Дзюбенко, Б. В. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах / Б. В. Дзюбенко, Ю. А. Кузма-Китча, А. И. Леонтьев. – М. : ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008. – 539 с.
11. Экспериментальное исследование пародинамического термосифона с кольцевыми каналами в испарителе и конденсаторе / Л. Л. Васильев [и др.] // Тепло- и массоперенос 2015 : сб. науч. тр. – Минск : ИТМО им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. – С. 18–23.
12. Экспериментальное исследование работы термосифонов, заправленных хладагентами R404A, R407C, R410A / А. В. Шаповалов [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2020. – № 3/4 (82, 83). – С. 87–93.