

УДК 536.24

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОСИФОНОВ, ЗАПРАВЛЕННЫХ ХЛАДАГЕНТАМИ R404A, R407C, R410A**А. В. ШАПОВАЛОВ, Н. М. КИДУН, Т. Н. НИКУЛИНА,
К. А. СВЕТЛИЧНЫЙ***Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Представлены результаты экспериментального исследования работы замкнутых двухфазных теплопередающих устройств, заправленных хладагентами R404A, R407C, R410A. Проведены эксперименты при углах наклона устройств (0, 90 град), что увеличивает область применения таких теплообменных элементов в промышленности. Диапазон подводимых тепловых потоков – 20–128 Вт, температура поверхности устройства изменялась в пределах +18...+63 °С. Установлена зависимость термического сопротивления термосифона от подводимой тепловой нагрузки, проведен анализ полученных результатов.

Ключевые слова: термосифон, замкнутые двухфазные теплопередающие устройства, хладагенты, тепловой поток.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE PERFORMANCE OF THERMOSIPHON LOADED WITH REFRIGERANTS R404A, R407C, R410A**A. V. SHAPOVALOV, N. M. KIDUN, T. N. NIKULINA,
K. A. SVETLICHNYI***Educational Institution “Sukhoi State Technical University
of Gomel”, the Republic of Belarus*

The article presents the result of the experimental research of closed, two-phased, heat-transmitting devices, loaded with refrigerants R404A, R407C, R410A. The experiments were done at the angles of inclination of device (0, 90 degrees), which increases the scope of application of such heat exchange elements in industry. The range of supplied heat fluxes is 20–128 W, device surface temperature varied within +18...+63 °C. The dependence of the thermal resistance of the thermosiphon from the supplied thermal load is established, the analysis of the obtained results is carried out.

Keyword: thermosiphon closed two-phased, heat-transmitting devices, refrigerants, heat flux.

Введение

Для успешной работы современного энергетического оборудования важное значение имеет отвод теплоты от отдельных тепловыделяющих элементов и поверхностей [1]–[3].

Замкнутые двухфазные термосифоны многими авторами [4]–[6] рассматриваются как достаточно перспективные, высокоэффективные, надежные теплопередающие теплообменные устройства за счет автономности, конструкционной гибкости, простоты изготовления, отсутствия движущихся частей, высокой интенсивности внутренних процессов теплопереноса, отсутствия насосов для перекачки теплоносителя и др. [7]. В связи с этим актуальным является исследование возможности применения термосифонов как основного элемента системы охлаждения приборов, устройств и оборудования [8]–[9].

В настоящее время термосифоны используются в промышленности достаточно редко. Объяснить данное явление можно тем, что еще недостаточно изучена физика процессов, протекающих в термосифонах (совместно протекающие процессы теплопроводности, конвекции и фазовых переходов в зонах испарения и конденсации). Помимо этого накопленные знания в данной области представляют собой, как правило, выводы, полученные для конкретных вариантов термосифонов и теплоносителей, конструктивных схем и технических решений [10]–[12]. Анализ результатов [13]–[16] исследований теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах показывает, что наиболее значимой характеристикой их работы является термическое сопротивление.

Целью работы является получение экспериментальных данных исследования работы эффективных двухфазных замкнутых теплопередающих систем, заправленных хладагентами R404A, R407C, R410A при разных углах наклона устройства к горизонту.

Описание установки и методики эксперимента

Для исследования процессов, протекающих в замкнутых двухфазных термосифонных устройствах, на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого» был создан экспериментальный стенд, представленный на рис. 1.



Рис. 1. Экспериментальный стенд

Методика проведения экспериментов заключалась в ступенчатом увеличении теплового потока с определенной выдержкой между двумя приращениями тепловой нагрузки для стабилизации изменяющихся параметров. Подвод теплового потока к испарителю осуществлялся спиральным электрическим нагревателем, мощность которого регулировалась с помощью лабораторного автотрансформатора. Охлаждение зоны конденсации производилось канальным вентилятором при постоянном расходе. Подробно методика проведения экспериментальных исследований представлена в [7].

Экспериментальные данные

В рамках представленного исследования была изучена и проанализирована работа цилиндрического и пародинамического термосифона с внутренними циркуляционными вставками (рис. 2). Объем заправки хладагентами составил 500 г – половина объема испарителя, угол наклона установки – 0 и 90 град.

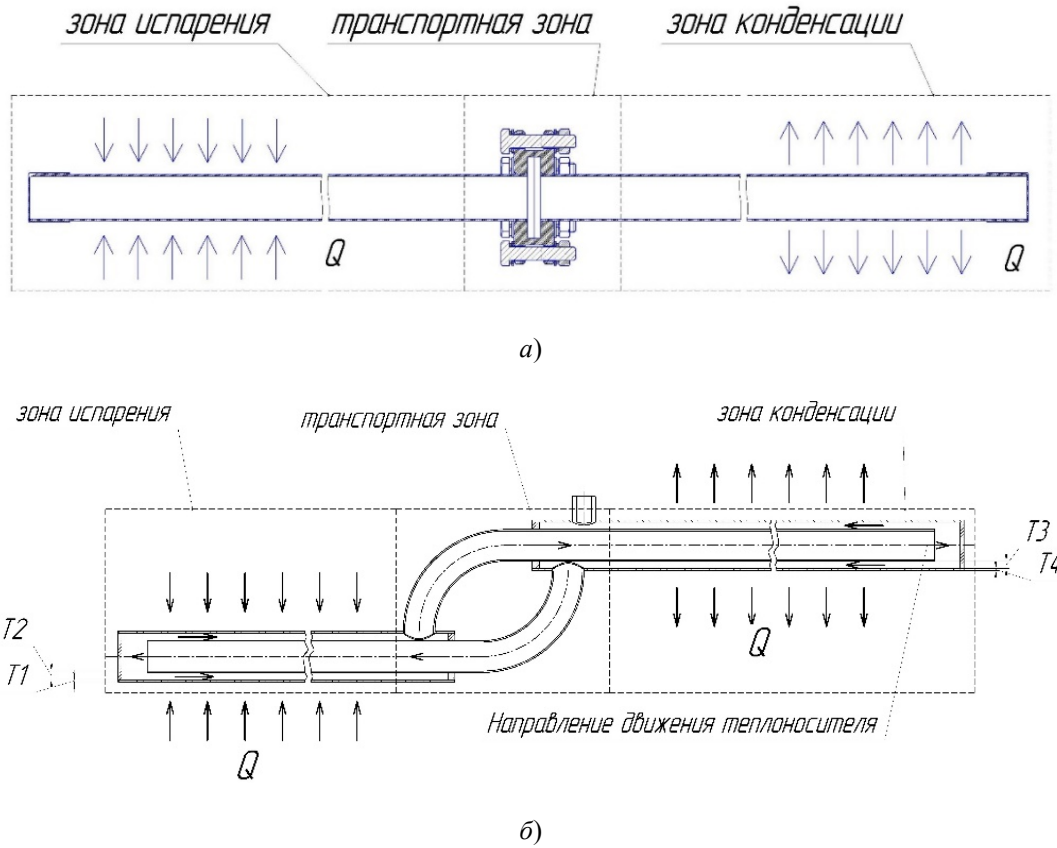


Рис. 2. Замкнутые двухфазные теплопередающие устройства:
 а – цилиндрический термосифон; б – пародинамический термосифон

На рис. 3 представлен график результатов опытных данных для цилиндрического (рис. 3, а) и пародинамического (рис. 3, б) термосифонов, заправленных фреонами R404A, R407C, R410A.

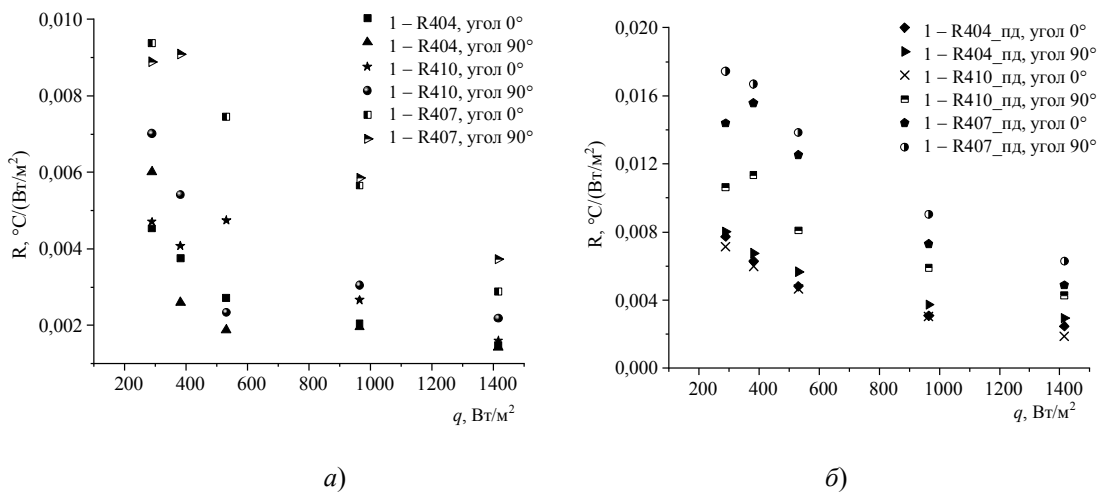


Рис. 3. Термическое сопротивление термосифонов при изменении подводимого теплового потока и угла наклона:
 а – цилиндрический термосифон; б – пародинамический термосифон

Анализ полученных результатов позволяет установить зависимость параметров, характеризующих эффективность работы термосифона, в частности термического сопротивления, от свойств фреонов, используемых для их заправки. Было установлено, что наибольшее влияние на значение термического сопротивления термосифона, от которого зависит значение коэффициента теплоотдачи α (обратно пропорциональная зависимость), оказывают такие параметры как давление p , плотность ρ , удельная теплота парообразования r , динамическая вязкость μ , удельная теплоемкость c , коэффициент теплопроводности λ используемой рабочей жидкости.

Экспериментально определено, что изменение угла наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости не влияет на теплопередающие характеристики устройства, термические сопротивления для указанных выше фреонов изменяются в диапазоне $0,0014\text{--}0,018\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2/\text{Вт}$ при плотности теплового потока $248\text{--}1415,28\text{ Вт/м}^2$.

Термическое сопротивление R термосифона непрерывно падает с увеличением давления при кипении фреонов (рис. 2). Это свидетельствует о росте коэффициента теплоотдачи α и повышении эффективности процесса теплоотдачи. Однако при низких давлениях зависимость α от p менее резкая, чем при высоких.

Исследование влияния коэффициента теплопроводности λ на значение термического сопротивления термосифона показало, что с ростом λ значение термического сопротивления уменьшается, следовательно, повышается эффективность работы термосифона. Также установлено незначительное уменьшение значения термического сопротивления с увеличением удельной теплоемкости c фреона.

Влияние всех вышеуказанных параметров в большей степени проявляется в диапазоне небольших подводимых мощностей до 50 Вт. С ростом подводимой нагрузки значение термического сопротивления термосифона становится более стабильным и практически не меняется на всем диапазоне.

Эксперименты показали, что термическое сопротивление для цилиндрического и пародинамического термосифонов значительно изменяется при увеличении теплового потока.

Также было отмечено, что термическое сопротивление цилиндрического и пародинамического термосифонов, заправленных фреоном R407C, значительно отличается по сравнению с фреонами R404A и R410A (рис. 4).

Данный факт можно объяснить тем, что температурный глайд для фреона R407C составляет $7,1\text{ }^\circ\text{C}$ (для R404A – $0,5\text{ }^\circ\text{C}$, R410A – менее $0,3\text{ }^\circ\text{C}$). Так как в процессе эксперимента давление в исследуемой установке повышалось, соответственно температурный глайд увеличивался, что привело к изменению теплофизических свойств при фазовых переходах в зонах испарения и конденсации и, как следствие, повышенному термическому сопротивлению термосифона при работе на фреоне R407C.

На основе экспериментальных данных были предложены методы расчета термических сопротивлений цилиндрического и пародинамического термосифонов. Данные методы позволяют установить обобщающие зависимости для расчета термического сопротивления испарителя и конденсатора цилиндрического и пародинамического термосифонов и могут быть использованы при моделировании процессов, протекающих в замкнутых двухфазных термосифонных системах. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных значений для R404a приведены ниже (рис. 5). Погрешность предложенной методики не превышает 25 %.

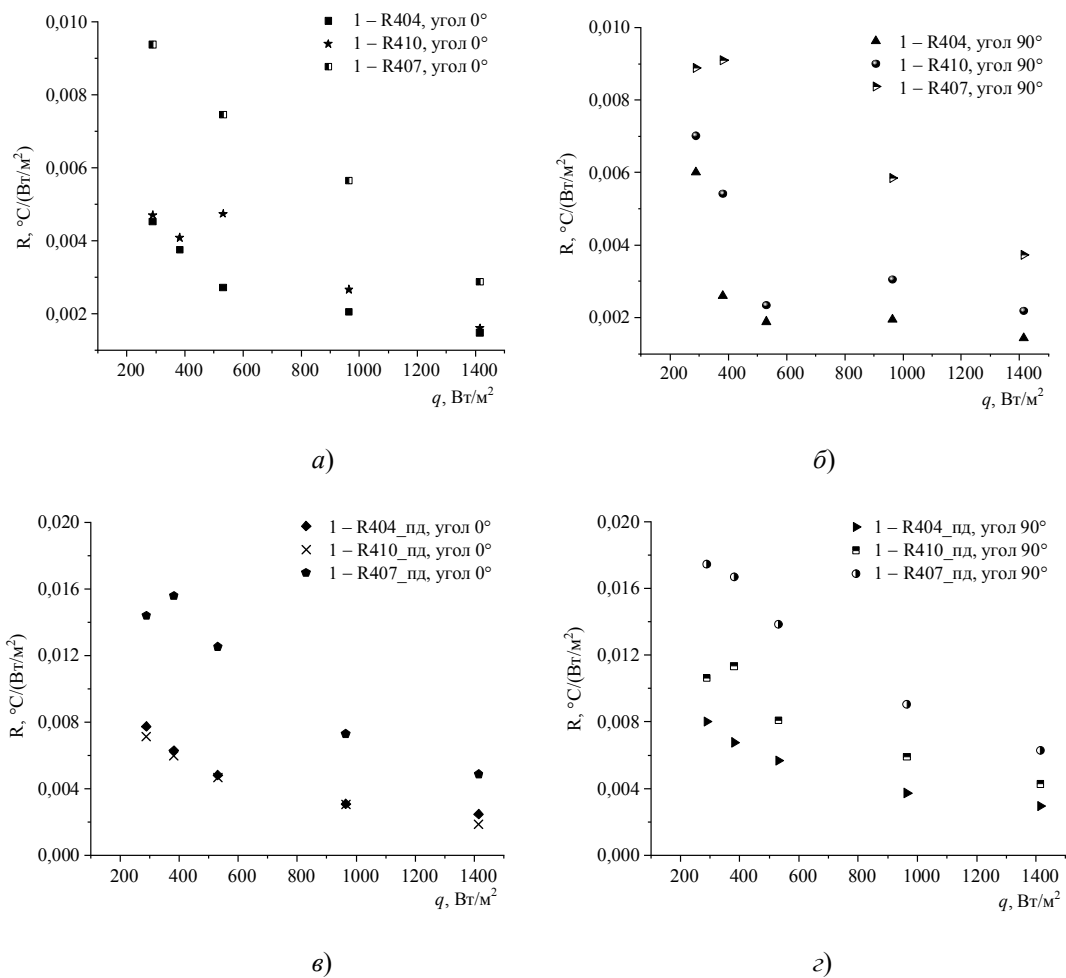


Рис. 4. Термическое сопротивление термосифонов, заправленных фреонами R404A, R407C, R410A: а – цилиндрический термосифон, угол наклона 0° град; б – цилиндрический термосифон, угол наклона 90° град; в – пародинамический термосифон, угол наклона 0° град; г – пародинамический термосифон, угол наклона 90° град

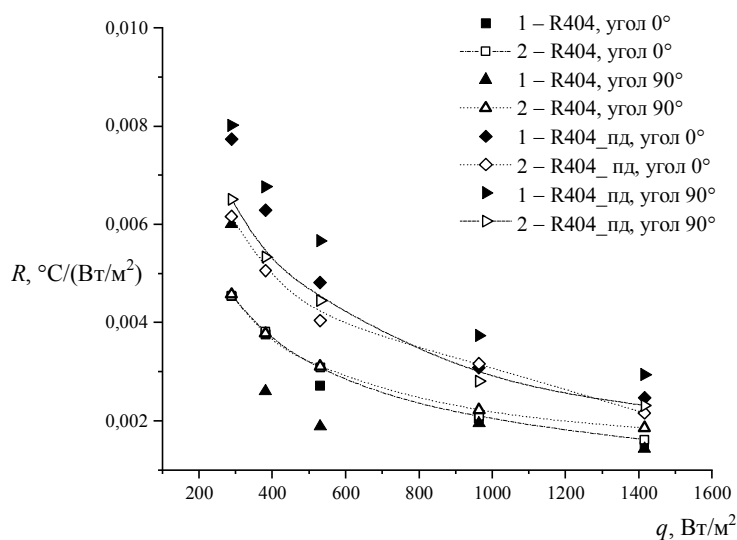


Рис. 5. Обработка опытных данных по разработанной методике: 1 – эксперимент; 2 – расчет

Заключение

Анализ полученных экспериментальных данных показал:

- изменение угла наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости не влияет на теплопередающие характеристики устройства, заправленного фреонами R404A, R407C, R410A;
- на величину термического сопротивления значительное влияние оказывает состав используемого фреона, а именно температурный глайд для зеотропных фреонов;
- термическое сопротивление для цилиндрического и пародинамического термосифонов значительно уменьшается при увеличении теплового потока.

Установленные экспериментальные данные в дальнейшем позволят разработать эффективные теплообменники с двухфазными теплопередающими элементами для их применения в энергетике, холодильной технике, системах вентиляции и кондиционирования, промышленности, с целью уменьшения потребляемой энергии, материалоёмкости, а также повышения качества выпускаемой продукции.

Литература

1. Garimella, S. V. On-chip thermal management with microchannel heat sinks and integrated micropumps / S. V. Garimella, V. Singhal, D. Liu // *Proceedings of the IEEE*. – 2006. – Vol. 94, № 8. – P. 1534–1548.
2. Investigation of a long term passive cooling system using two-phase thermosyphon loops for the nuclear reactor spent fuel pool / W. Fu [et al.] // *Annals of Nuclear Energy*. – 2015. – Vol. 85. – P. 346–356.
3. Xue, Z. H. High performance loop heat pipe with flat evaporator for energy-saving cooling systems of supercomputers / Z. H. Xue, W. Qu, M. H. Xie // *J. Heat Transfer*. – 2020. – No. 142 (3). – 7 p.
4. 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.
5. Безродный, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М. К. Безродный, И. Л. Пиоро, Т. О. Костюк. – К. : Факт, 2005. – 704 с.
6. Накоряков, В. Е. Тепломассообмен при фазовых переходах и химических превращениях в микроканальных системах / В. Е. Накоряков, В. В. Кузнецов // *Тр. 4-й РНКТ, Москва, 23–27 окт. 2006 г. : в 2 т. / РАН, МЭИ*. – М., 2006. – Т. 1. – С. 33–37.
7. 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.
8. Васильев, Л. Л. Перспективы применения тепловых насосов в Республике Беларусь / Л. Л. Васильев // *Инженер.-физ. журн.* – 2005. – Т. 78, № 1. – С. 23–34.
9. Безродный, М. К. Двухфазные термосифоны в промышленной теплотехнике / М. К. Безродный, С. С. Волков, В. Ф. Мокляк. – К. : Вища школа, 1991. – 75 с.
10. Noie, S. H. Heat transfer characteristics of a two-phase closed thermosyphon / S. H. Noie // *Appl Therm Eng.* – 2005. – Vol. 25. – P. 495–506.
11. Кузнецов, Г. В. Режимы смешанной конвекции в замкнутом двухфазном термосифоне цилиндрической формы / Г. В. Кузнецов, М. А. Аль-Ани, М. А. Шеремет // *Изв. Том. политехн. ун-та*. – 2011. – Т. 318, № 4. – С. 18–23.

12. 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.
13. 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.
14. Экспериментальное исследование процессов переноса в термосифоне как элементе энергосберегающей технологии при производстве солей на основе фосфорной кислоты / М. П. Тюрин [и др.] // Дизайн и технологии. – 2014. – № 39. – С. 28–33.
15. Hashimoto, H. Heat transfer characteristics in a condenser of closed two-phase thermosyphon: effect of entrainment on heat transfer deterioration / H. Hashimoto, F. Kaminaga // Heat Transf – Asian Res. – 2002. – Vol. 31. – P. 212–225.
16. Sobhan, C. B. A review and comparative study of the investigations on micro heat pipes / C. B. Sobhan, R. L. Rag, G. P. Peterson // Int J Energy Res. – 2007. – Vol. 31. – P. 664–688.

Получено 04.11.2020 г.