

УДК 536.24

<https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-3-38-44>

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕСС ТЕПЛООБМЕНА В ЗАМКНУТЫХ ДВУХФАЗНЫХ ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ СИСТЕМАХ

**А. В. ШАПОВАЛОВ, Н. М. КИДУН, Т. Н. НИКУЛИНА,  
П. С. КОЛМАЧЕВА, А. В. ТАРАН**

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

*Проведен анализ свойств низкотемпературных теплоносителей (озонобезопасных фреонов) для использования в качестве теплоносителей в термосифонных элементах. Определены наиболее существенные теплофизические свойства теплоносителей, влияющие на интенсивность теплообмена в замкнутых двухфазных теплопередающих устройствах. Приведен расчет показателя качества FOM теплоносителя для выбранных фреонов. Установлена зависимость термического сопротивления термосифонного элемента от подводимой тепловой нагрузки. Даны рекомендации по выбору теплоносителя для двухфазных теплопередающих элементов.*

**Ключевые слова:** теплоноситель, фреон, теплофизические свойства теплоносителя, показатель качества теплоносителя, термосифон.

**Для цитирования.** Влияние теплофизических свойств теплоносителей на процесс теплообмена в замкнутых двухфазных теплопередающих системах / А. В. Шаповалов [и др.] // Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого. – 2024. – № 3 (98). – С. 38–44. <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-3-38-44>

## THE INFLUENCE OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF HEAT CARRIERS ON THE HEAT EXCHANGE PROCESS IN CLOSED TWO-PHASE HEAT TRANSFER SYSTEMS

**A. V. SHAPOVALOV, N. M. KIDUN, T. N. NIKULINA,  
P. S. KOLMACHEVA, A. V. TARAN**

*Sukhoi State Technical University of Gomel,  
the Republic of Belarus*

*The analysis of low-temperature heat carriers (ozone-safe freons) properties for use as heat carriers in thermosyphon elements has been carried out. The most significant thermophysical properties of heat carriers that affect the intensity of heat exchange in closed two-phase heat-transfer devices have been determined. The calculation of the FOM quality index of the heat carrier for the selected freons is given. The dependence of the thermal resistance of the thermosyphon element on the supplied heat load is established. Recommendations are given for choosing a heat carrier for two-phase heat-transfer elements.*

**Keywords:** heat carrier, freon, thermophysical properties of heat carrier, quality index of the heat carrier, thermosyphon.

**For citation.** Shapovalov A. V., Kidun N. M., Nikulina T. N., Kolmacheva, P. S., Taran A. V. The influence of thermophysical properties of heat carriers on the heat exchange process in closed two-phase heat transfer systems. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2024, no. 3 (98), pp. 38–44 (in Russian). <https://doi.org/10.62595/1819-5245-2024-3-38-44>

## Введение

Замкнутые двухфазные термосифоны рассматриваются как достаточно перспективные, высокоэффективные и надежные теплопередающие теплообменные устройства. В связи с этим актуальным является исследование возможности применения термосифонов как основного элемента системы охлаждения приборов, устройств и оборудования [1–3].

На кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого сотрудниками и студентами проводятся научные эксперименты и опыты по теплообмену в замкнутых двухфазных теплопередающих элементах, заполненных различными теплоносителями.

Экспериментальная установка с термосифонным элементом представлена на рис. 1.

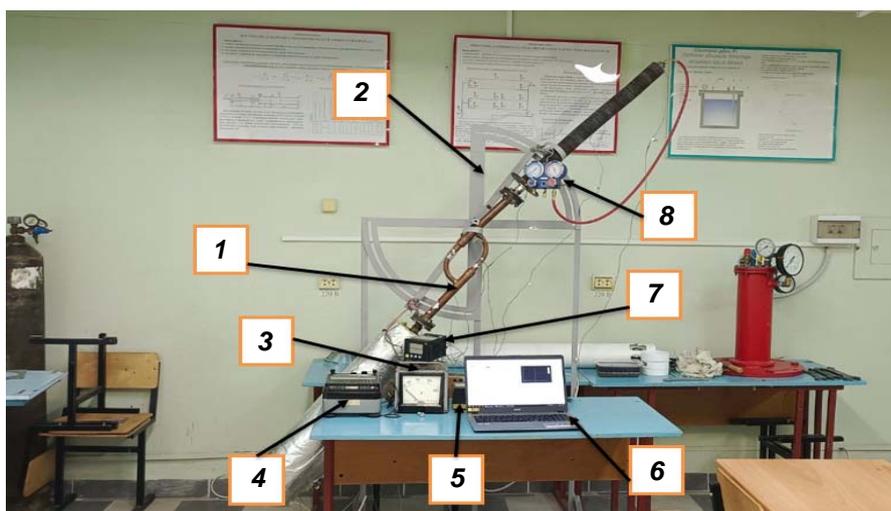


Рис. 1. Экспериментальный стенд:

1 – термосифон; 2 – стойка; 3 – лабораторный автотрансформатор;  
4 – амперметр; 5 – вольтметр; 6 – компьютер, для сбора данных;  
7 – измеритель-регулятор; 8 – манометр

Целью данной работы является выбор теплоносителя для экспериментальных исследований и изучение процесса теплообмена для создания эффективных теплообменных аппаратов с применением термосифонов.

## Основная часть

### Анализ свойств теплоносителей, применяемых в двухфазных теплопередающих устройствах

Тепловые характеристики термосифона зависят от типа рабочей жидкости – теплоносителя, степени заполнения (отношения объема жидкости к объему испарителя), геометрических размеров, угла наклона к горизонту, давления в полости термосифона, расхода и температуры охлаждающего теплоносителя.

При выборе теплоносителя необходимо учитывать следующие условия: рабочий диапазон температур и давлений; максимальный тепловой поток в испарителе термосифона; теплофизические свойства, такие как температура кипения, плавления, критические параметры, теплота парообразования, плотность пара; токсичность; огне- и взрывоопасность; условия работы устройства в течение длительного времени.

Теоретически в качестве теплоносителей можно применять любые химические соединения и вещества, которые имеют жидкую и паровую фазы в рабочем интервале температур и давлений. На практике применяется весьма ограниченное количество жидкостей.

Лучшим теплоносителем по многим параметрам является вода. Она общедоступна, пожаро- и взрывобезопасна, обеспечивает наибольший теплоперенос из всех известных теплоносителей. Однако, несмотря на значительные преимущества, вода как теплоноситель для создания эффективных теплообменных аппаратов на основе термосифонов имеет существенный недостаток – высокую температуру фазового перехода, а следовательно, – большие тепловые потоки, которые необходимо подводить к испарителю замкнутого двухфазного теплопередающего устройства.

В качестве низкотемпературных теплоносителей можно использовать спирты, эфиры, фреоны. В данной статье особое внимание уделяется использованию озонобезопасных хладагентов – фреонов, что позволит в дальнейшем разработать теплообменный аппарат на основе термосифонов для утилизации тепла в современных промышленных системах передачи теплоты и использования тепла вторичных энергоресурсов.

На сегодняшний день насчитываются десятки видов фреонов, но в промышленности используют несколько – R134a, R404a, R410a и R407c. С 1 января 2020 г. в ЕС вступил в силу запрет на новое стационарное холодильное оборудование, работающее на хладагентах с ПГП (потенциал глобального потепления) выше 2500, из-за чего придется отказаться от R404a, чей ПГП равен 3922.

Теплопередающая способность термосифона зависит от теплопроводности, теплоемкости, скрытой теплоты парообразования, вязкости, поверхностного натяжения теплоносителя.

Известно следующее:

– чем больше теплопроводность и скрытая теплота парообразования жидкости, тем интенсивнее теплопередача;

– чем больше теплоемкость теплоносителя, тем выше скорость роста пузырей в слое жидкости на нижней крышке термосифона и эффективнее процесс охлаждения (поглощение и отвод теплоты).

Основные теплофизические свойства фреонов R134a, R410a и R407c представлены в таблице.

#### Основные характеристики теплоносителей

Температура $t$ , °C	Давление $p$ , бар	Удельная теплота парообразования $r$ , кДж/кг	Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м · К)	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Динамический коэффициент вязкости $\mu$ , Па · с
<b>R407c</b>					
-20	2,97	211,36	0,10194	1321	0,0002694
0	6,01	196,07	0,09215	1249	0,0002083
20	10,93	177,73	0,08235	1168	0,000161
40	18,37	154,88	0,07256	1071	0,0001222
50	23,24	140,12	0,06766	1013	0,0001051
<b>R410a</b>					
-20	4,01	243,84	0,11007	1245	0,0002118
0	8,01	221,23	0,09993	1170	0,0001674
20	14,48	193,88	0,08978	1083	0,0001301
40	24,26	158,55	0,07964	976	0,0000983
50	30,71	135,33	0,07457	907	0,0000843

Окончание

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Давление $p, \text{бар}$	Удельная теплота парообразования $r, \text{кДж/кг}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda_l, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Плотность $\rho_l, \text{кг/м}^3$	Динамический коэффициент вязкости $\mu_l, \text{Па}\cdot\text{с}$
<b>R134a</b>					
-20	1,33	212,95	0,10205	1359	0,0003545
0	2,93	198,49	0,09421	1295	0,0002728
20	5,72	182,02	0,08565	1225	0,0002107
40	10,17	162,9	0,0771	1146	0,0001619
50	13,18	151,86	0,07282	1102	0,0001411

Для выбора теплоносителя в [1, 4] рекомендуется использовать показатель качества FOM (figure of merit):

$$\text{FOM} = (r\lambda_l^3\rho_l^2\mu_l^{-1})^{0,25}, \quad (1)$$

где  $r$  – теплота парообразования, Дж/кг;  $\lambda_l$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\rho_l$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_l$  – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Расчет, произведенный по формуле (1) на основании данных, приведенных в таблице, показал, что оптимальным теплоносителем является фреон R410a (рис. 2).

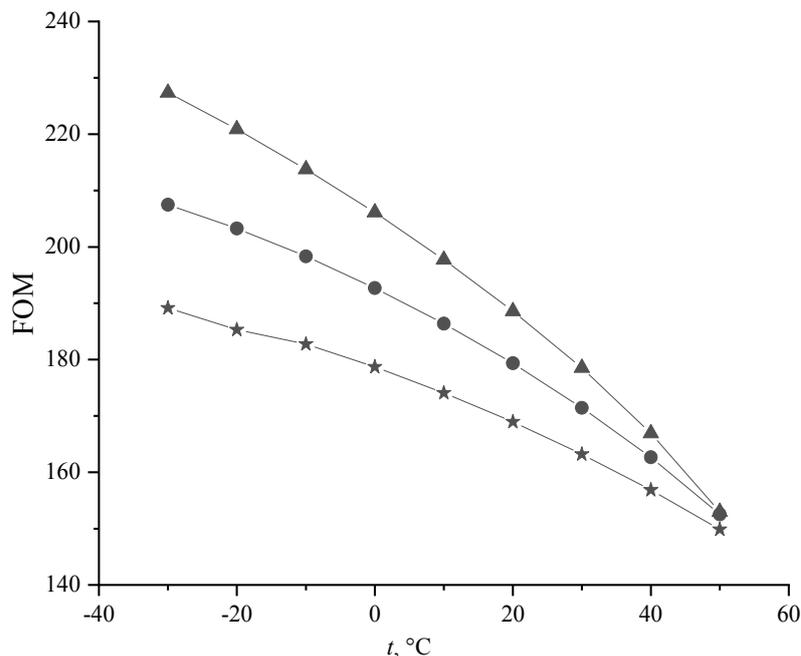


Рис. 2. Определение показателя качества теплоносителя (FOM):

—●— R407c; —▲— R410a; —★— R134a

### Экспериментальное исследование процесса теплообмена

Работа замкнутого двухфазного теплопередающего устройства подразумевает наличие фазовых переходов – испарения и конденсации. При определении FOM принимаются во внимание только теплофизические свойства теплоносителя в жидком состоянии, что в полной мере не учитывает особенностей работы термосифона.

Для подтверждения результатов (рис. 2) и возможности их применения на практике в рамках данной работы было проведено экспериментальное исследование работы термосифона, заправленного различными теплоносителями.

Методика проведения экспериментов [5, 6] заключалась в ступенчатом увеличении теплового потока с определенной выдержкой между двумя приращениями тепловой нагрузки. Этот интервал во времени необходим для стабилизации изменяющихся параметров. Охлаждение зоны конденсации производилось за счет наружного оребрения конденсатора. Соблюдались следующие условия проводимых экспериментов:

- теплоноситель – R134a, R410a, R407c;
- объем заправки – 500 мл;
- угол наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости –  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ .
- подводимая тепловая нагрузка к испарителю – 0–128 Вт.

Термическое сопротивление термосифона  $R$ ,  $^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}$  определяется по формуле

$$R = \frac{t_n - t_k}{q}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2/\text{Вт}, \quad (2)$$

где  $q$  – теплового поток, отнесенный к единице площади поверхности,  $\text{Вт}/^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2$ ;  $t_n$  – температура в начале исследуемого участка термосифона,  $^\circ\text{C}$ ;  $t_k$  – температура в конце исследуемого участка термосифона,  $^\circ\text{C}$ .

Результаты эксперимента показаны на рис. 3.

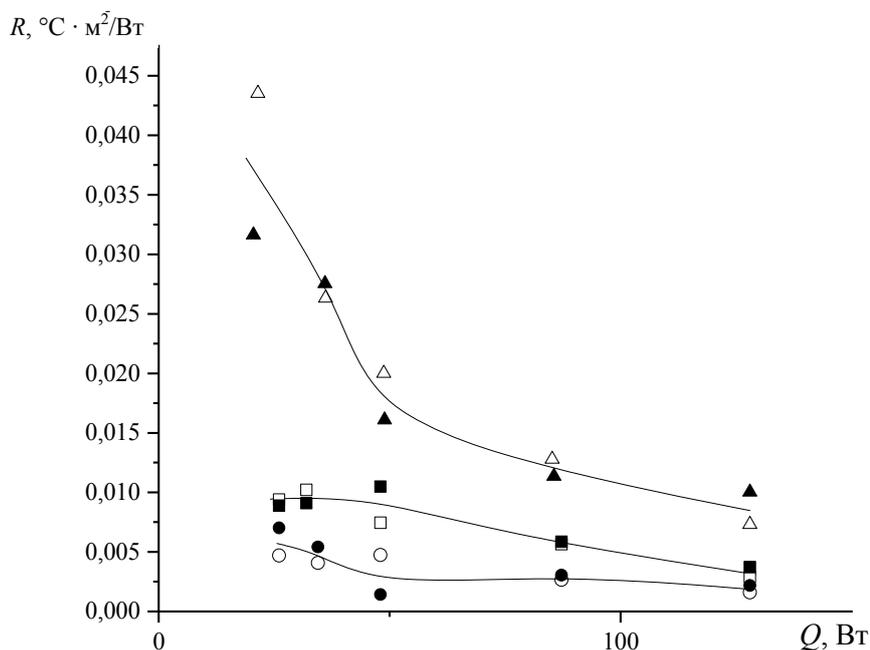


Рис. 3. Зависимость термического сопротивления от подводимого теплового потока:

- $\blacksquare$  – фреон 407, угол наклона –  $90^\circ$ ;  $\square$  – фреон 407, угол наклона –  $0^\circ$ ;
- $\triangle$  – фреон 134, угол наклона –  $0^\circ$ ;  $\blacktriangle$  – фреон 134, угол наклона –  $90^\circ$ ;
- $\circ$  – фреон 410, угол наклона –  $0^\circ$ ;  $\bullet$  – фреон 410, угол наклона –  $90^\circ$

Наименьшие значения термического сопротивления двухфазного теплопередающего элемента определены для промежуточного теплоносителя R410a в широком интервале подводимых тепловых потоков. Результаты расчета и эксперимен-

тальные данные совпадают, что позволяет сделать заключение о возможности использования показателя качества FOM при выборе теплоносителя для замкнутых двухфазных теплопередающих систем.

### Заключение

Выполнен расчет показателя качества FOM выбранных низкотемпературных теплоносителей. Получен массив экспериментальных данных при исследовании процесса теплообмена в замкнутых двухфазных термосифонных элементах, заправленных озонобезопасными хладагентами, с развитой поверхностью конденсатора.

На основании опытно-экспериментальных и теоретических исследований установлены наиболее существенные теплофизические свойства теплоносителей для двухфазных замкнутых теплопередающих устройств. При сравнении теплофизических свойств теплоносителей необходимо отдавать предпочтение теплоносителям с большей теплотой парообразования и теплоемкостью и меньшей плотностью и динамической вязкостью. При этом, несмотря на то, что принципиально возможно функционирование устройств на всем диапазоне температур, рабочий интервал температур должен соответствовать средней части указанного диапазона, исключая состояния глубокого вакуума и давлений, близких к критическому.

Таким образом, по результатам данной работы можно сделать вывод о том, что в качестве рабочей жидкости для экспериментальных исследований предпочтительным будет выбор озонобезопасного фреона R410a.

### Литература

1. Heat Pipes: Theory, Design and Applications / H. Jouhara [et al.]. – 7th ed. – Oxford : Butterworth Heinemann, 2023. – 352 p.
2. Автономные устройства с испарительно-конденсационным циклом для терморегулирования теплонагруженной аппаратуры / Л. Л. Васильев [и др.] // *Elektronnaya Obrabotka Materialov*. EOM. – 2024. – Vol. 60, N 1. – P. 89–97. <https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.1.089>
3. Chilbule, P. V. Heat pipe integrated solar thermal systems and applications: A review / P. V. Chilbule, L. P. Dhole // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 60, pt. 3. – P. 1491–1496.
4. Faghri, A. Heat Pipe Science and Technology / A. Faghri. – Sec. ed. – Global Digital Press, 2016. – 1056 p.
5. 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.
6. Результаты экспериментального исследования теплообмена в термосифонном элементе с оребренной поверхностью конденсатора при изменении условий расположения элемента в пространстве / А. В. Шаповалов [и др.] // *Вестн. Гомел. гос. техн. ун-та им. П. О. Сухого*. – 2022. – № 4 (91). – С. 73–77.

### References

1. Jouhara H., Reay D., McGlen R., Kew P., McDonough J. *Heat Pipes: Theory, Design and Applications*. Oxford, Butterworth Heinemann Publ., 2023. 352 p.
2. Vasiliev L. L., Zhuravlyov A. S., Kuzmich M. A., Grakovich L. P., Rabetsky M. I., Dragun L. A. Independent devices with evaporation-condensation cycle for thermal control of heat-loaded equipment. *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, 2024, vol. 60, no. 1, pp. 89–97 (in Russian).

3. Chilbule P. V., Dhole L. P. Heat pipe integrated solar thermal systems and applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 60, pt. 3, pp. 1491–1496.
4. Faghri A. *Heat Pipe Science and Technology*. Global Digital Press Publ., 2016. 1056 p.
5. Shapovalov A. V., Rodin A. V., Zhiharev R. Results of experimental study of steam-dynamic thermosyphon. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Suhogo*, 2015, no. 3, pp. 58–64 (in Russian).
6. Shapovalov A. V., Nikulina T. N., Kidun N. M., Chernyavskaya V. V. Results of an experimental study of heat exchange in a thermosiphon element with a finned surface of a condenser with changing conditions of the element's location in space. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Suhogo*, 2022, no. 4 (91), pp. 73–77 (in Russian).

Поступила 02.09.2024 г.