

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕЛОНОСИТЕЛЕЙ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЦЕСС ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩИХ ТЕПЛОООБМЕННЫХ УСТРОЙСТВАХ

**Шаповалов
Александр Валерьевич**

Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого, Республика Беларусь
канд. техн. наук, доцент, проректор по идеологической
и воспитательной работе

**Кидун
Наталья Михайловна**

Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого, Республика Беларусь
старший преподаватель
nkidun@ya.ru

**Никулина
Татьяна Николаевна**

Гомельский государственный технический университет
имени П.О. Сухого, Республика Беларусь
старший преподаватель

Аннотация. Произведен анализ свойств низкотемпературных теплоносителей (озоно-безопасных фреонов). Выявлены наиболее существенные теплофизические свойства теплоносителей, влияющие на процесс теплообмена в замкнутых двухфазных теплопередающих устройствах. Приведен расчет показателя качества FOM, для выбранных теплоносителей. Установлена зависимость термического сопротивления от подводимой тепловой нагрузки термосифона. Даны рекомендации по выбору теплоносителя для термосифона.

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

Замкнутые двухфазные термосифоны рассматриваются как достаточно перспективные, высокоэффективные, 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].

Объектом исследования является процесс теплообмена в замкнутом двухфазном теплопередающем элементе – термосифоне.

Целью работы является:

- анализ и выявление наиболее существенных свойств теплоносителей для двухфазных теплопередающих устройств;
- выбор теплоносителя для экспериментальных исследований;
- экспериментальное исследование процесса теплообмена для создания эффективных теплообменных аппаратов с применением термосифонов.

Предметом исследования является модель теплообменника на основе термосифонных элементов с улучшенными характеристиками (рис. 1).

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.

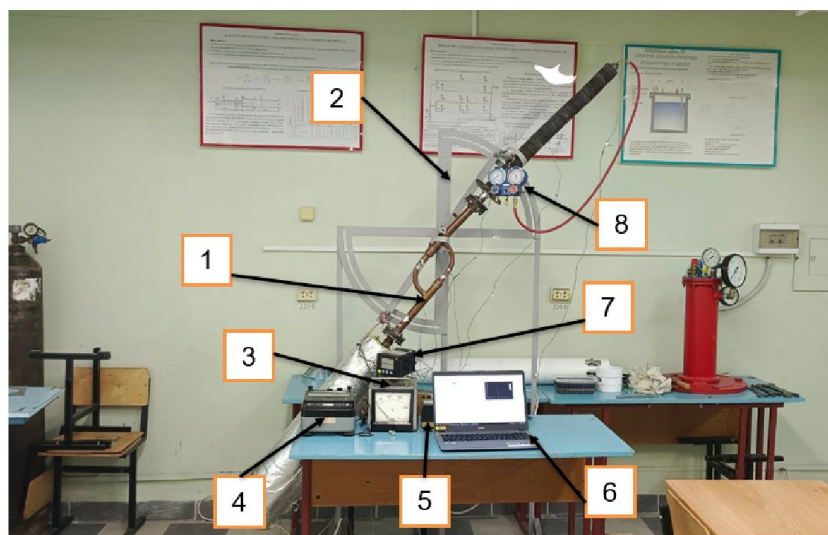


Рисунок 1 – Экспериментальный стенд: 1 – термосифон; 2 – стойка; 3 – лабораторный автотрансформатор; 4 – амперметр; 5 – вольтметр; 6 – компьютер, для сбора данных; 7 – измеритель-регулятор Сосна-002; 8 – манометр

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

Лучшим теплоносителем по многим параметрам является вода. Она обеспечивает наибольший теплоперенос из всех известных теплоносителей, общедоступна, пожаро- и взрывобезопасна. 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 года 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, что:

- 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).

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

$$FOM = (r \cdot \lambda_l^3 \cdot \rho_l^2 \cdot \mu_l^{-1})^{0.25} \quad (1)$$

где r – теплота парообразования, Дж/кг; λ_l – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ_l – плотность, кг/м³; μ_l – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Расчет, произведенный по ф.1 на основании теплофизических свойств теплоносителей показал, что оптимальным теплоносителем является фреон R410a (рис. 2).

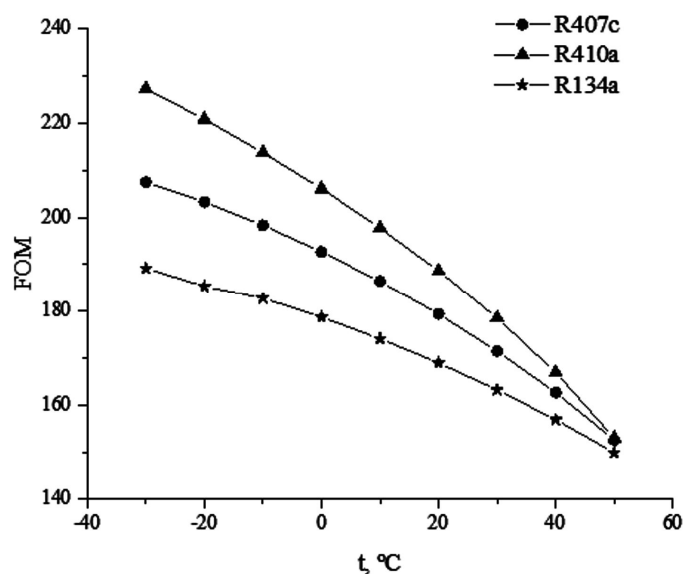


Рисунок 2 – Определение показателя качества теплоносителя (FOM)

Экспериментальное исследование процесса теплообмена

Работа замкнутого двухфазного теплопередающего устройства подразумевает наличие фазовых переходов – испарение и конденсация. При определении FOM учитываются только теплофизические свойства теплоносителя в состоянии жидкости, 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 обременения конденсатора. Условия проводимых экспериментов:

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

Следует отметить, что наиболее значимой характеристикой работы термосифона является его термическое сопротивление.

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

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

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 представлены на рисунке 3.

Результаты расчета и экспериментальные данные совпадают, что позволяет сделать заключение о возможности использования показателя качества FOM для выбора теплоносителя для замкнутых двухфазных теплопередающих систем. По результатам данной работы в качестве рабочей жидкости для экспериментальных исследований в качестве предпочтительного выбран озонобезопасный фреон R410a.

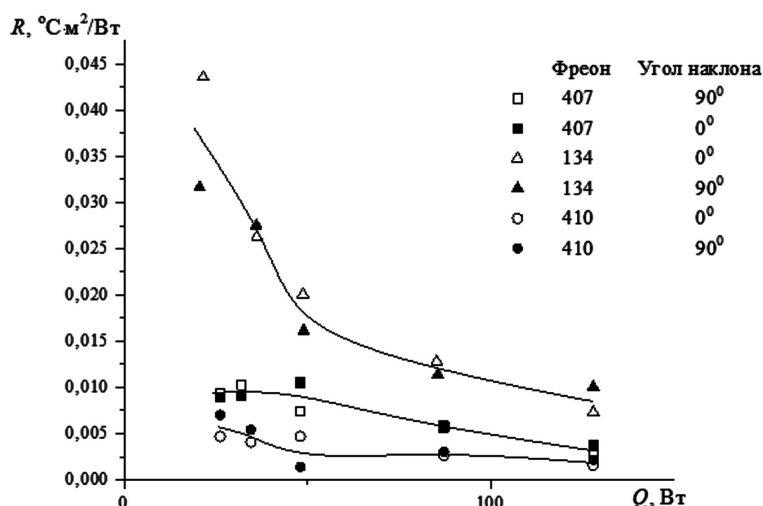


Рисунок 3 – Зависимость термического сопротивления от подводимого теплового потока

Список литературы:

1. Heat Pipes: Theory, Design and Applications / H. Jouhara [et al.]. – Butterworth Heinemann, Oxford. – 7th Edition, 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. – № 1. – P. 89–97. – URL : <https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.1.089>.
3. Chilbule P.V., Dhole L.P. Heat pipe integrated solar thermal systems and applications: A review // Materials Today: Proceedings. – 2022. – V. 60. – Part 3. – P. 1491–1496.
4. Faghri A. Heat Pipe Science and Technology. Global Digital Press. – Second Edition, 2016. – 1056 p.
5. Шаповалов А.В., Родин А.В., Жихарев Р.Н. Результаты экспериментального исследования пародинамического термосифона // Вестник ГГТУ им. П.О.Сухого. – Гомель, 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.] // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого : научно-практический журнал. – Гомель, 2022. – № 4. – С. 73–77.