

2. Романов А. Е., Куклев И. К. Расчет точности привязки космофотоснимков КТА к плано-высотной основе карт // Геодезия и картография. 2002. № 11. С. 25–31.
  3. Пат. № 216.013.25BF от 10.02.2015 / И. В. Самойлов, И. В. Москати́нцев. Двухканальный космический телескоп для одновременного наблюдения земли и звезд (варианты).
  4. Космический полет НПО им. С. А. Лавочкина. М.: Изд. МАИ-ПРИНТ, 2010. – 692 с.
  5. Космический астрометрический эксперимент «Ломоносов» // Сб. науч. тр. МГУ им. М. В. Ломоносова. Гос. астрон. ин-т им. П. К. Штернберга; М.: Изд. МГУ, 1992. С. 191.
  6. Стеколыщиков О. Ю., Захаров А. И., Прохоров М. Е. Конструктивные особенности узкопольного звёздного датчика ГАИШ МГУ с зеркальным объективом // Сб. тр. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов» М.: ИКИ РАН, 2013. С. 69–79.
  7. Романов А. Е. Математическая модель экспонирования снимков неравнояркой поверхности Земли // Исследование Земли из космоса. 2012. № 6. С. 34–61.
  8. Цаплин С. В., Большев С. А., Мишагин Б. С., Шеманаев Д. В. Экспериментальные исследования макета оптико-телескопического комплекса космического аппарата при воздействии тепловых факторов космического пространства в лабораторных условиях // Вестн. Самарского гос. ун-та. Естественная серия. 2014. Т. 118, № 7. С. 134–143.
  9. Цаплин С. В., Большев С. А. Моделирование теплового режима оптико-электронного телескопического комплекса микроспутника // Изв. ВУЗов. Приборостроение. 2018. Т. 6, № 5. С. 430–436.
- 

УДК 532.24

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЗАМКНУТОГО ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

**А. В. Шаповалов, А. В. Родин, Н. М. Кидун, Т. Н. Никулина**

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель,  
Республика Беларусь*

Утилизация тепла с помощью тепловых труб и термосифонов представляет определенный интерес. Некоторые иностранные компании начали разрабатывать свои теплообменники с использованием замкнутых двухфазных теплопередающих устройств, термосифонов. Термосифоны – герметично запаянные трубки с теплоносителем внутри, который закипает у нагретой поверхности трубки и конденсируется у охлажденной. Одной из таких компаний является итальянская компания Cominter, которая производит фреоновые рекуперативные теплообменники (RCD) – аппараты, разделенные на две части, через одну из которых осуществляется вход воздуха, через другую – выход. [1]. Подробно такие устройства и области их применения описаны в [2].

Для исследования процессов, протекающих в полости термосифонов, на кафедре «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого» был изготовлен экспериментальный стенд, представленный на рис. 1. На специально спроектированной стойке 2 размещен термосифон 1. Стойка обеспечивает поворот устройства в вертикальной плоскости от горизонтального до вертикального положения. Для подвода теплового потока к испарителю термосифона служит спиральный электрический нагреватель. Подводимая мощность к нагревателю

регулируется при помощи лабораторного автотрансформатора 3. Величина подводимой электрической мощности определяется по показаниям амперметра 4 типа М1104 и вольтметра 5 типа М1108, установленных на рабочем столе. Также на рабочем столе расположен компьютер для сбора данных 6, измеритель-регулятор 7, в конце транспортной зоны расположен манометр 8.

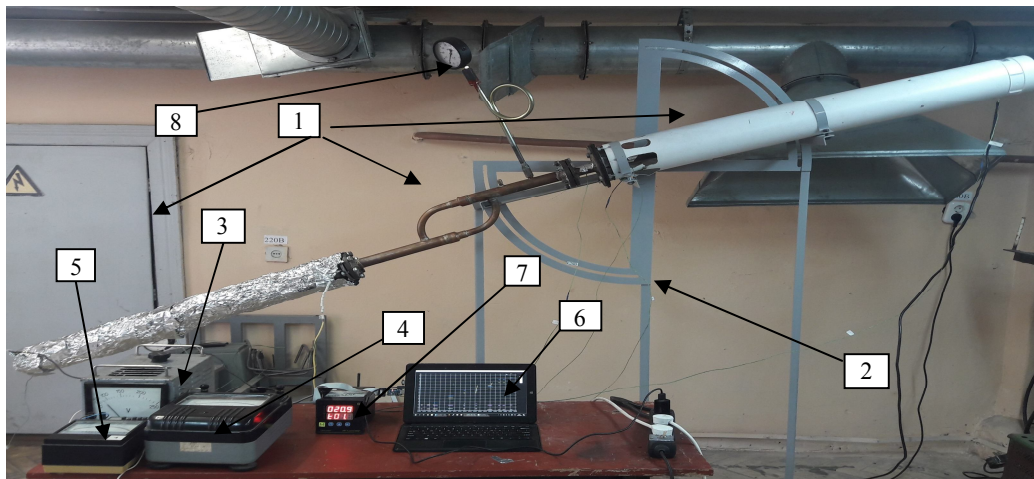


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования работы двухфазного теплопередающего устройства

Для снижения тепловых потерь в устройстве применена трубчатая изоляция K Flex Solar HT на основе вспененного каучука. Преимущества данного теплоизоляционного материала в том, что он может использоваться при температуре до плюс 150 градусов. Для регистрации температуры насыщения и давления внутри устройства подобран и установлен манометр в конце транспортной зоны. Для измерения температуры использовались 9 хромель-копелевых термопар с диаметром проводников 0,2 мм. Термопары устанавливались на внешние поверхности труб. Предварительно места установки были зачищены и обезжирены для обеспечения лучшего контакта термопары со стенкой испарителя и конденсатора термосифона. Сбор информации производился с помощью измерителя-регулятора с последующей передачей показаний температуры на компьютер.

Методика проведения опытов заключалась в ступенчатом увеличении подводимого теплового потока к испарителю термосифона с определенным интервалом между приращениями тепловой нагрузки для стабилизации изменяющихся параметров. Охлаждение зоны конденсации производилось вентилятором в кожухе кольцевого канала при переменном расходе воздуха.

В качестве изменяемых параметров эксперимента были определены вид жидкости, заправляемой в термосифон, объем заправляемого теплоносителя, величина подводимого теплового потока к испарителю и угол поворота термосифона относительно горизонтальной плоскости.

Условия проводимых экспериментов:

- заправляемые в термосифон жидкости – дистиллированная вода, этиловый спирт, озонобезопасный хладагент R134a;
- объем заправляемой жидкости – 250 мл (1/4 объема испарителя), 500 мл (1/2 объема испарителя);
- углы наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости – 0°, 30°, 35° и 40°;
- подводимая тепловая нагрузка к испарителю: эксперименты с водой и этиловым спиртом – от 227,7 до 481,5 Вт (2530–5350 Вт/м<sup>2</sup>), эксперименты с фреоном R134a – от 21,5 до 238 Вт (238,9–2643,3 Вт/м<sup>2</sup>).

При проведении экспериментов было установлено, что влияние угла наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости на его работу проявляется только при заправке устройства водой (объем 500 мл) в интервале подводимых тепловых нагрузок до 350 Вт. При увеличении угла наклона установлено незначительное увеличение интенсивности теплообмена как в зоне испарения, так и в зоне конденсации.

Из рис. 2, 3 можно сделать вывод, что изменение положения термосифона в пространстве в вертикальной плоскости в диапазоне увеличения угла наклона от 0 до 40° при объеме заправки этиловым спиртом и хладагентом R134a 250 мл и 500 мл не влияет на интенсивность теплообмена при работе термосифона.

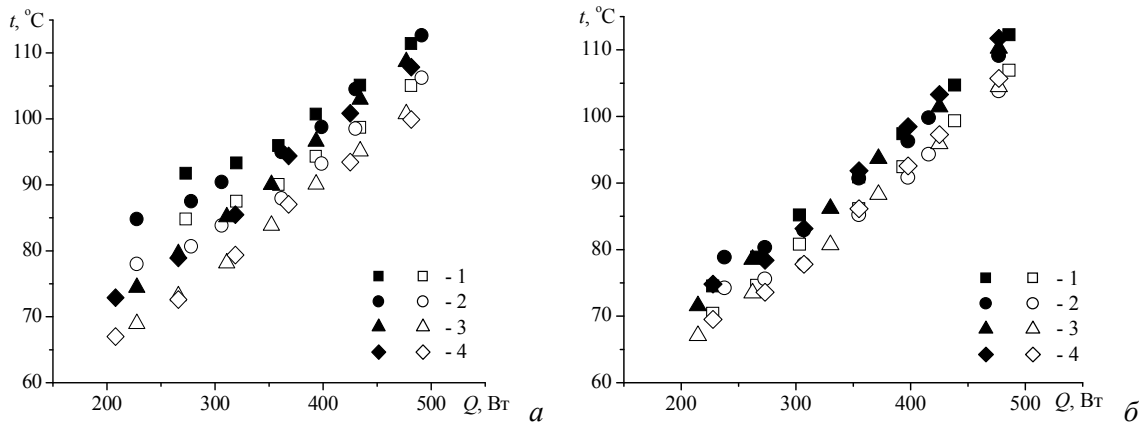


Рис. 2. Средние температуры испарителя и конденсатора в зависимости от подводимого теплового потока  $Q$  и угла наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости (теплоноситель – вода): объем заправки 500 мл (а), объем заправки 250 мл (б); 1 – угол наклона 0°, 2 – 30°, 3 – 35°, 4 – 40°; темные точки – испаритель, светлые – конденсатор

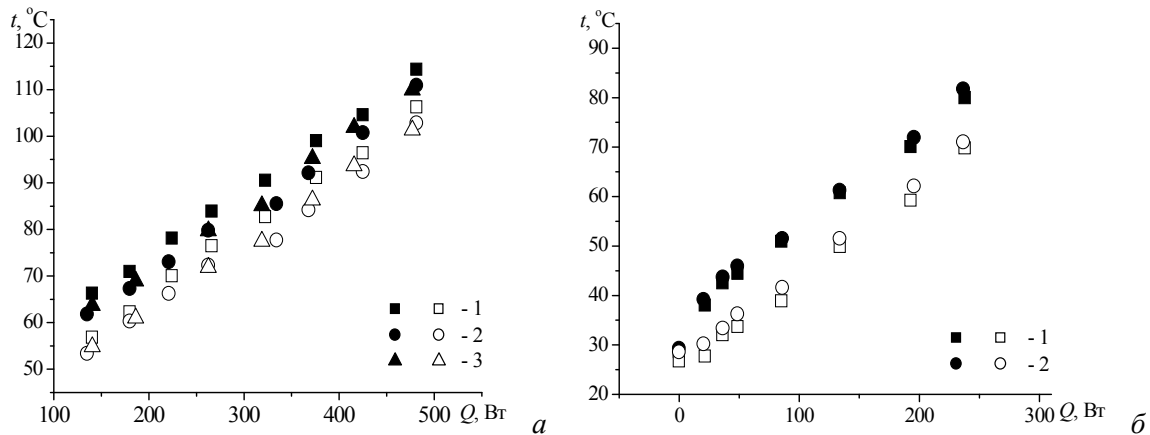


Рис. 3. Средние температуры испарителя и конденсатора в зависимости от подводимого теплового потока  $Q$  и угла наклона термосифона относительно горизонтальной плоскости: теплоноситель – этиловый спирт (а), хладагент R134a (б); 1 – угол наклона 0°, 2 – 30°, 3 – 35°; темные точки – испаритель, светлые – конденсатор

Одной из возможных областей применения теплообменных аппаратов с термосифонами является использование их в качестве маслоохладителей газотурбинной установки.

Температура слива масла с подшипников турбины составляет 60–70 °С, а температура слива масла из редуктора – 75–80 °С, что позволяет использовать в теплообменных аппаратах с термосифонами в качестве внутреннего теплоносителя не только фреон, но и дистиллированную воду при создании достаточного уровня разрежения при заправке термосифона.

В качестве охлаждающей среды, поступающей на конденсатор теплообменника с термосифонами, можно использовать 50% раствор вода–этиленгликоль, который затем подается

на «сухие» вентиляторные градирни для охлаждения. Добавление этиленгликоля в охлаждающую среду позволяет избежать возникновения ледяных пробок в зимнее время в наружных циркуляционных трубопроводах контура охлаждения турбины.

Возможная схема применения маслоохладителя газовой турбины с термосифонами приведена на рис. 4. Также теплообменные аппараты с термосифонами можно применять в схемах воздухоохладителя газовой турбины, в схемах вентиляции, кондиционирования и осушения воздуха. Принципиальная технологическая схема установки для осушения воздуха представлена на рис. 5.

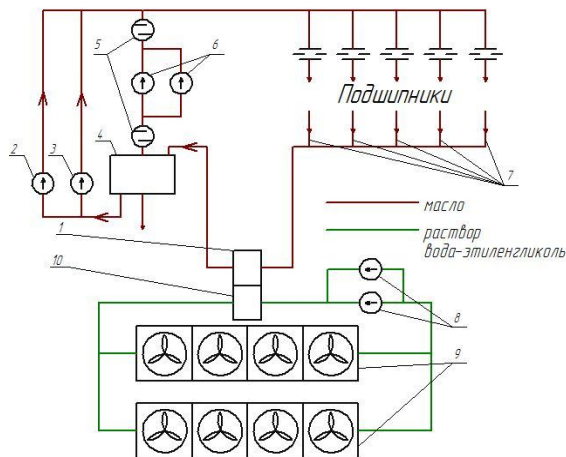


Рис. 4. Схема применения маслоохладителя газовой турбины с термосифонами: 1 – испаритель маслоохладителя с термосифонами; 2 – вспомогательный масляный насос; 3 – аварийный масляный насос; 4 – маслобак газовой турбины; 5 – масляные фильтры; 6 – масляные насосы; 7 – сливы масла с подшипников газовой турбины и из редуктора; 8 – насосы контуров градирен ГТУ; 9 – градирни контура ГТУ; 10 – конденсатор маслоохладителя с термосифонами

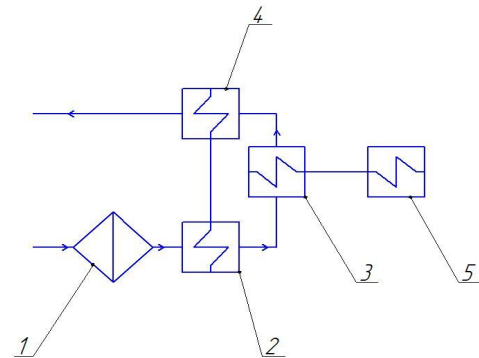


Рис. 5. Технологическая схема установки для осушения воздуха: 1 – блок фильтрации воздуха; 2 – испаритель теплообменника на основе тепловых труб; 3 – испаритель парокомпрессионной холодильной машины; 4 – конденсатор теплообменника на основе тепловых труб; 5 – конденсатор парокомпрессионной холодильной машины

Преимущество разрабатываемого устройства по сравнению с уже существующими аналогами: уменьшение эксплуатационных затрат за счет снижения мощности парокомпрессионной холодильной машины, снижение потребления электроэнергии. Это позволяет использовать устройство в системах с ограниченной мощностью, например, получающих электроэнергию от солнечных батарей.

## Литература

1. Cominter. [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://www.comintersrl.com>. Дата доступа 10.11.2019.
2. Васильев Леонард Л., Васильев Леонид Л., Журавлев А. С., Рабецкий М. И., Шаповалов А. В., Родин А. В. Пародинамические термосифоны и их применение в тепловом оборудовании различного назначения // Тепло- и массоперенос–2013: сб. науч. тр. Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2014. С. 12–16.
3. Васильев Л. Л., Журавлёв А. С., Шаповалов А. В., Родин А. В. Использование теплообменников на тепловых трубах для кондиционирования, в области пищевой промышленности и холодильной техники // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2014. № 3. С. 85–90.