

Фазу сигнала можно скачкообразно менять, подавая и снимая напряжение 5В в различных комбинациях с верхних и нижних концов линий фазовращателя.

С помощью набора данных фазовращателей, подключенным ко входам излучателей антенной решетки, можно обеспечить сканирование луча диаграммы направленности в пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хижа, Г.С., Вендик И.Б., Серебрякова Е.А. СВЧ фазовращатели и переключатели – Москва «радио и связь», 1984 – 184 с.

2. Захаренко, В.А. Пояснительная записка научно-исследовательская работа по заданию 2.13 «Разработка и исследование экспериментального образца бортовой антенной системы с управляемой диаграммой направленности для беспилотных летательных аппаратов самолетного типа», ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», 2021-2025 годы (этап № 1.2) по теме: обоснование вариантов реализации антенной системы и ее конструкции – Минск 2024 – С. 5,9.

УДК 536.24;623.746

ДВУХФАЗНЫЕ ПРОВОДНИКИ ТЕПЛА ДЛЯ ПАССИВНОГО ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

Л.Л. ВАСИЛЬЕВ, А.С. ЖУРАВЛЁВ, Д.И. САДЧЕНКО

Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси
Минск, Беларусь

В настоящее время на воздушном, наземном и водном транспорте активно развиваются беспилотные технологии. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) успешно применяются в различных сферах деятельности человека. В гражданском секторе это экономика (строительство, сельское и лесное хозяйство, энергетика, логистика), научные исследования (экологический мониторинг, съёмка и картографирование местности), поисковые и спасательные операции при чрезвычайных обстоятельствах [1, 2].

На борту БПЛА имеется тепловыделяющее оборудование: аккумуляторные батареи, топливные элементы или другие источники энергии, радиоэлектронные системы, специальная аппаратура для выполнения полетного задания. Для охлаждения теплонагруженных объектов

в БПЛА с неподвижным крылом (самолетного типа) используется встречный поток воздуха, в квадрокоптерах воздушный поток создается также вращающимися винтами. Однако при обдуве аппаратуры окружающим атмосферным воздухом требуется оснастить воздушный контур фильтрами и влагоотделителем, а это влечет необходимость установки мощного вентилятора для преодоления дополнительного аэродинамического сопротивления. Как следствие, ухудшаются весовые характеристики аппарата, а на работу вентилятора тратится дефицитная на борту электроэнергия DeWaghter и др.[3], создавшие и испытывавшие беспилотный летательный аппарат с гибридным двигателем, отмечают, что значительная часть мощности теряется на охлаждение топливного элемента, которое можно было бы осуществлять пассивно за счёт набегающего воздуха. Необходимо также иметь в виду, что часть оборудования может быть размещено в герметичном контейнере, и воздухообмен его внутреннего пространства с наружной средой технически сложен. В этом случае могут быть использованы пассивные двухфазные проводники тепла – тепловые трубы (ТТ), рис. 1, и контурные термосифоны (КТС) обладающие более высокой эффективной теплопроводностью, чем металлы, включая медь и серебро [4]. Внутри герметичного корпуса заправленных жидкостью ТТ и КТС реализуется испарительно-конденсационный цикл. Поглощаемое подведенное к испарителю тепло поглощается, приводит к интенсивному парообразованию рабочей жидкости и переносится массой пара в зону конденсации, где пар конденсируется, выделяя поглощенное тепло. В ТТ конденсат под действием капиллярного давления возвращается по фитилю в испаритель, и цикл замыкается. Термосифон (ТС) не имеет капиллярного фитиля, конденсат стекает в испаритель самотеком, поэтому испаритель ТС должен быть расположен ниже конденсатора, что ограничивает область применения ТС. Для ТТ это условие не обязательно. В КТС конденсат также возвращается в испаритель под действием сил гравитации, но при дополнительном воздействии давления пара, поэтому он работоспособен в широком диапазоне углов наклона.

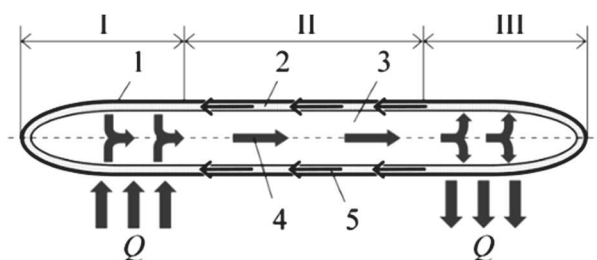


Рис. 1. Тепловая труба: I – испаритель, II – адиабатическая зона, III – конденсатор, 1 – корпус, 2 – капиллярный фитиль, 3 – паровой канал, 4 – пар, 5 – жидкость, Q – тепловой поток.

Тепло от конденсатора ТТ и КТС отводится охлаждающей жидкостью или потоком воздуха, то есть это комбинированная система охлаждения. В воздушной и жидкостной системах необходимо подвести хладагент к охлаждаемому объекту, что удлиняет и искривляет воздушный тракт, повышая гидравлическое сопротивление, а ТТ и КТС позволяют без энергозатрат доставить тепло в зону, удобную для расположения воздушного радиатора либо жидкостного теплообменника. Пример успешных летных испытаний системы терморегулирования на основе КТС на самолёте Embraer [5] позволяет сделать прогноз о перспективности подобных технологий для БПЛА.

На рис. 2 представлены общий вид и схема КТС с двумя плоскими испарителями. Все детали устройства изготовлены из алюминиевых сплавов. Конструкционный материал выбран с учетом его весовой характеристики и механических свойств. Вертикально расположенные испарители 1 и 2 состоят из отдельных мини-каналов и объединены паровым и жидкостным коллекторами. Мини-каналы разделены тонкими ребрами толщиной 1 мм, которые увеличивают площадь поверхности теплообмена и, соответственно, скорость испарения рабочей жидкости. Потоки пара и жидкости в КТС разделены: пар перемещается в конденсатор по паровой трубке 5, конденсат возвращается в испаритель по жидкостной трубке 8. Отсутствие трения между паром и жидкостью благоприятно влияет на гидродинамику фазопеременного потока в контуре, что положительно влияет на теплопередающую способность устройства. Соотношение внутренних диаметров паровой и жидкостной трубок составляет 2:1, это гарантирует отсутствие реверсного движения пара и блокировки жидкостной трубки.

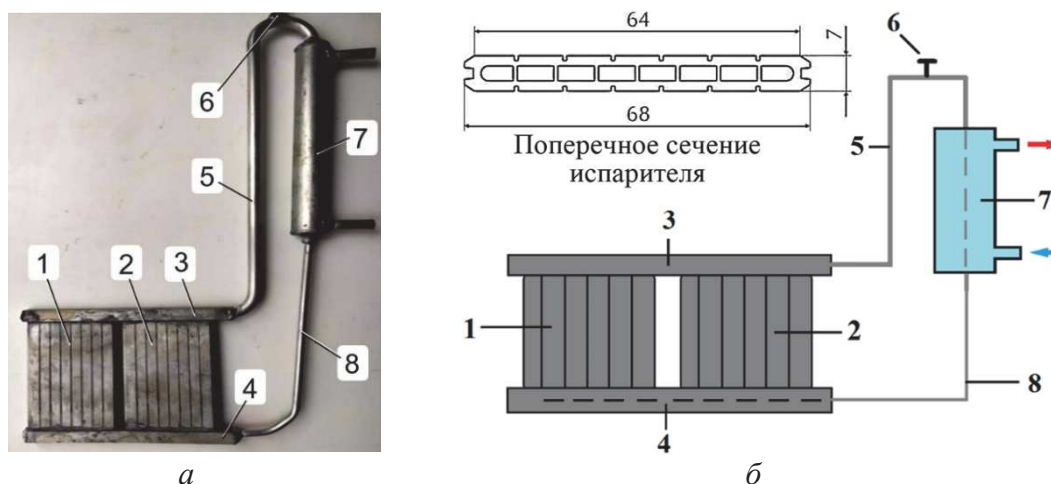


Рис. 2. Фотография (а) и схема (б) термосифона с двумя испарителями:

1, 2 – испарители; 3 – паровой коллектор; 4 – жидкостный коллектор; 5 – паровая трубка; 6 – заправочный штуцер; 7 – конденсатор; 8 – жидкостная трубка.

Термосифон исследован с ацетоном в качестве рабочей жидкости и жидкостным теплообменником на конденсаторе, возможно также использование воздушного радиатора. Результаты показали, что КТС и его основные компоненты (испарители и конденсатор) обладают низкими термическими сопротивлениями $R_{\text{КТС}} = (\bar{T}_{\text{и}} - \bar{T}_{\text{к}})/Q$, $R_{\text{и}} = (\bar{T}_{\text{и}} - T_{\text{п}})/Q$ и $R_{\text{к}} = (T_{\text{п}} - \bar{T}_{\text{к}})/Q$, где $\bar{T}_{\text{и}}$ и $\bar{T}_{\text{к}}$ – усредненные температуры поверхностей испарителя и конденсатора. Термосифон обладает хорошей динамикой запуска и реакцией на тепловые нагрузки. На рис. 3 приведены характеристики, полученные при одном теплонагруженном испарителе 1, однако эксперименты показали, что стабильность работы КТС сохраняется при асимметричном подводе тепла к поверхностям обоих испарителей. При подаче тепловой нагрузки на испаритель 2 температура испарителя 1 практически не изменяется.

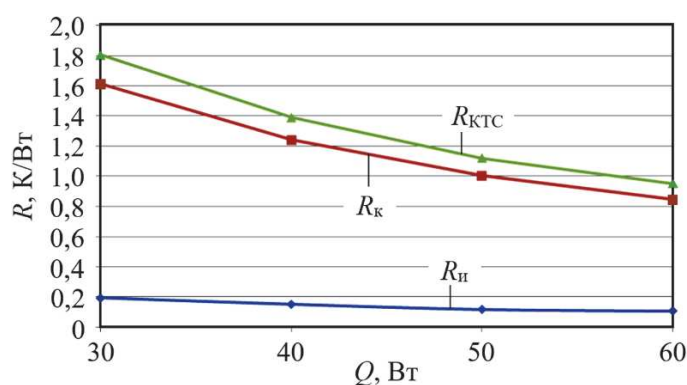


Рис. 3. Значение термических сопротивлений теплонагруженного испарителя 1 ($R_{\text{и}}$), конденсатора ($R_{\text{к}}$) и полное сопротивление КТС ($R_{\text{КТС}}$) при различных тепловых нагрузках.

Устройство обладает хорошими теплопередающими свойствами и может быть применено для терморегулирования оборудования БПЛА. Плоская форма приемников тепла удобна для присоединения к ним теплонагруженных объектов, на каждом испарителе возможно расположение источников тепловыделения разной мощности. Трубопроводы малого диаметра легко гнутся, что облегчает монтаж КТС в условиях конструкции БПЛА. Целесообразность использования ТТ и КТС определяется сравнительным анализом весовых характеристик таких пассивных устройств и таких компонентов, как воздушные фильтры, влагоотделители и вентиляторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беспилотные аппараты «БПЛА – 2024» : сб. ст. Междунар. Молодежн. форума. Минск, 22–26 апреля 2024 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; отв. за изд. И. В. Войтов. Минск: БГТУ, 2024. – С. 78–149.

2. Обзор беспилотных авиационных систем доставки грузов / Е.В. Соломин, А. С. Мартыянов, Х.Шахин [и др.] // Сибирский аэрокосмический журнал. – 2025. – Т. 26, № 2. – С. 264–290.
3. TheNederDrone: Ahybridlift, hybridenergyhydrogenUAV / C. De Waghter, B. Remes, E. Smeur[etal.] // InternationalJournal of Hydrogen Energy. – April 2021. – Vol. 46, Issue 29. – P. 16003–16018.
4. Vasiliev, L. Two-phase heat conductors for passive thermal regulation systems of electric vehicles / L. Vasiliev, A. Zhuravlyov, D. Sadchenko // MechanicalEngineeringAdvances. – 2025. – 3(2). – 2052.
5. In-flight testing of loop thermosyphons for aircraft cooling / L. G. Oliveira, C. Tecchio, K. V. Paiva [et al.] // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 98, 5 April. – P. 144–156.

УДК 355.424

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В СОВРЕМЕННОЙ ВОЙНЕ

Л.Л. ЖАРКЕВИЧ

Белорусский государственный технологический университет
Минск, Беларусь

В последние годы все большее распространение в современной войне получает использование беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Беспилотный летательный аппарат – это летательный аппарат многоразового или условно-многоразового использования, не имеющий на борту экипажа (человека-пилота) и способный самостоятельно целенаправленно перемещаться в воздухе для выполнения различных функций в автономном режиме (с помощью собственной управляющей программы) или посредством дистанционного управления (осуществляемого человеком-оператором со стационарного или мобильного пульта управления [1, с. 13, 17-18; 2, с. 13]. Беспилотные летательные аппараты прочно прописались на поле современного боя, а точнее, в небе над театром боевых действий. Эти летательные аппараты стали неотъемлемой частью военных arsenалов по всему миру, предоставляя ряд возможностей, которые ранее