

# ВСЕСТОРОННИЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

*Румянцев Н.В.*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Научный руководитель: Алексеев В.Ф. – канд.техн.наук, доцент, доцент кафедры ПИКС*

**Аннотация.** Эта обзорная статья, посвященная обзору исследований в области разработок и моделирования тепловых труб. В данной обзорной статье представлен всесторонний обзор последних достижений и применений технологии тепловых труб в радиоэлектронных средствах. В частности, рассматриваются новые разработки в области моделирования и имитации тепловых труб. Статья предоставляет обзор современных достижений в этой области, а также предлагает возможности для дальнейших исследований и разработок в области пассивного охлаждения.

**Ключевые слова:** тепловые трубки, *heat pipe*, тепловые режимы

Тепловая трубка в качестве теплопроводящих устройств широко используются для управления температурным режимом электронных устройств. В основном тепловая трубка имеет схожий принцип в работе с испарительной камерой. Принцип работы ТТ основан на фитильной структуре, и двухфазном потоке в процессе передачи тепла. Они проходят через жидкость, испаряющуюся в месте контакта с нагревательным элементом, а пар конденсируется в противоположном конце ТТ. Жидкость возвращается в зону контакта (нагреваемую) через структуру фитиля с помощью капиллярной силы. Характеристики теплопередачи в ТТ представляют собой одномерный перенос тепла и двумерное распределение тепла [1]. В настоящее время миниатюризация и высокая эффективность тепловых трубок находит наибольший спрос в использовании в РЭС малого размера таких как ноутбуки и смартфоны.

Тепловые трубки получили широкое распространение в качестве эффективного устройства теплообмена. ТТ была запатентована Гауглером в 1944 г. [2]. Основные конструкции и принципы работы тепловой трубы показаны на рис. 1. Тепловые трубки широко используются в управлении тепловым режимом мощных электронных устройства из-за их простой конструкции, высокой надежности и эффективной передачи тепла [3]. Благодаря постоянному совершенствованию производственного процесса, ультратонкая тепловая трубка (УТТ (*UTHP* в англ. источнике)) также может быть изготовлена и использована в РЭС.

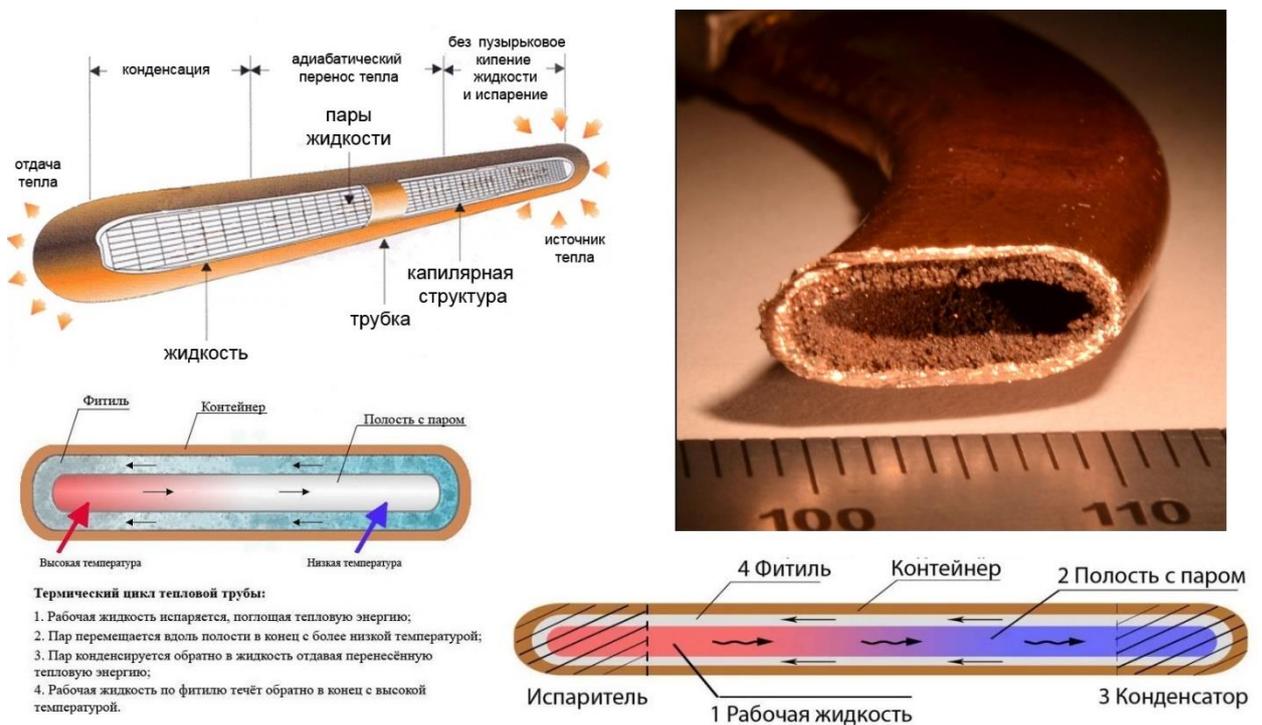


Рисунок 1 – Устройство работы ТТ [23]

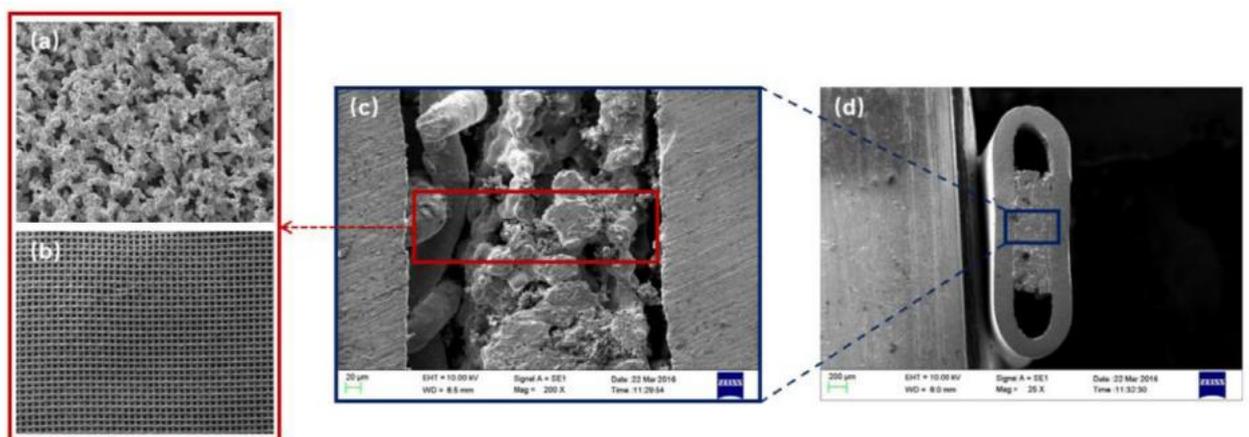


Рисунок 2. СЭМ фотография (а) медной пены; (б) частичная сетка; (в) структура ультратонкой тепловой трубки; (г) вид в поперечном сечении УТТ [4].

Ряд методов был разработан и использован для улучшения характеристик теплопередачи тепловых труб. Для структурной оптимизации была изучена структура фитиля, из-за его существенной роли в потоке и теплообмене внутри ТТ. Т. Шиога и др. [5] предложили новый метод изготовления, который может стереть зазор между внутренними стенками контейнера испарителя и фитиля. Это подавит утечку паров контейнера из испарителя.

Чжоу и др. [6,7] предложили серию сеток спирального плетения (ССП (SWM в англ. источнике)). Фитиль, который мог бы обеспечить баланс,

увеличение способности теплопередачи и снижения веса конструкции для УТТ. Они также предложили своего рода составную структуру фитиля, состоящую из медной пены и сетки, как показано на рисунке 2 (а-з). Данная структура обладает одновременно лучшими характеристиками теплопередачи и механической прочности [4]. Чен и др. [8] предложил разновидность поверхностных функциональных фитилей, которые могут обеспечить лучшую капиллярную производительность. Это позволяет гарантировать более лучшую теплоотдачу УТТ. Ванг и др. [9], предложили новую иерархическую структуру фитиля для ТТ и математическую модель для описания капиллярного давления и капиллярного подъема жидкости. Ли и др. [10] разработали процесс изготовления фитиля из супергидрофильной медной сетки для плоских ТТ. В сравнение с чистым медным листом и чешуйками пиролитического графита, данный процесс увеличил эффективную теплопроводность в 80 и 36 раз, соответственно.

Угол наклона является важным параметром, который влияет на характеристики теплопередачи ТТ. Чжан и др. [11] указали, что дополнительная фитильная структура повысила эффективность теплопередачи при меньших углах наклона ( $30^\circ$  и  $60^\circ$ ) по сравнению с тепловой трубкой без фитиля. Но в вертикальном положении гладкая тепловая трубка показала более низкое тепловое сопротивление и температурную разность.

Яо и др. [12] также отметили что угол наклона существенно повлиял на охлаждающую способность микро-ТТ. Эффективная теплопроводность уменьшилась от 5820 до 295 Вт/м·К при изменении угла наклона от  $90^\circ$  до  $75^\circ$ . Далее, Ли и др. [13] отметили, что спеченная пористая фитильная структура обеспечивает достаточное капиллярное давление и защиту по сравнению с отсутствием спекания. Следовательно, пористая капиллярная структура может в определенной степени противодействовать влиянию центробежных ускорений и обеспечить лучшую тепловую нагрузку на ТТ. Кроме того, существуют другие исследования способствующие оптимизации конструкции ТТ. Тараил и др. [14] использовали наночастицы для покрытия испарителя, которые могут улучшить теплопередачу из-за стимуляции процесса кипения. Линг и другие. [15] на основе конструктивного закона сконструировали новые листообразные осциллирующие ТТ, создающие определенный эффект повышения теплопередачи.

Кроме того, рабочая жидкость в ТТ также влияет на тепловые характеристики. Сардарабади и др. [16] показали, что наножидкость в сочетании с функциональной группой натрия может улучшить тепловые характеристики. Сюй и др. [17] указали, что смесь деионизированной воды (*DI water*) и *HFE-7100* могут уменьшить тепловое сопротивление ТТ. Рамкумар и др. [18] также указали, что ацетон может улучшить коэффициент теплопередачи на 79,81% и снизить термическое сопротивление на 10,52% по сравнению с метанолом в качестве рабочей жидкости.

Коэффициент заполнения рабочей жидкости в тепловой трубе также оказывает значительное влияние на способность к охлаждению [19, 20], а Чжоу и др. [4] указал что более высокие или более низкие коэффициенты заполнения могут привести к ухудшению эффекта теплопередачи из-за увеличения термического сопротивления.

Анализ условий работы ТТ также имеет большое значение для применения тепловой трубы. Вернер и др. [21] указали что тепловое сопротивление может быть использовано в качестве индикатора для определения наступления предела кипения ТТ. Ван и др. [22] на основе искусственной нейронной сети (ИНС) предложили модель, которая могла предсказывать термическое сопротивление пульсирующей ТТ при различных рабочих условиях.

Тепловая трубка является эффективным методом управления тепловым режимом в РЭС, и ее преимущества не вызывают сомнений. Однако, ТТ также сталкивается с некоторыми вопросами, которые необходимо решить. **Во-первых**, для улучшения капиллярных свойств и теплопередачи, фитильная структура должна найти более оптимизированные методы проектирования и производства. Такие как гидрофильная обработка поверхности, обработка гидрофильной поверхности и многомасштабное изготовление. Кроме того, УТТ имеет широкий диапазон перспектив применения под тенденцией плоских и гибких электронных устройств. Поэтому при проектировании УТТ необходимо постоянно улучшать структурную устойчивость и поддерживать баланс между повышением теплопередачи и портативностью. Задачи по выбору материала и структурное проектирование, а также руководство по универсальному дизайну, все задачи достойны внимания. Выбор материала корпуса, сочетания качества фитиля и оболочки также значительно влияет на работоспособность и стабильность ТТ. Кроме того, технология искусственного интеллекта также применялась для проектирования ТТ. Оптимизация его методов обучения и расчета заслуживает дальнейшего изучения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Liu T., Asheghi M., Goodson K. E. Performance and manufacturing of silicon-based vapor chambers //Applied Mechanics Reviews. – 2021. – Т. 73. – №. 1.
- [2] S. Richard, Gaugler, Heat transfer device, in, United States, 1944.
- [3] Tang H. et al. Review of applications and developments of ultra-thin micro heat pipes for electronic cooling //Applied energy. – 2018. – Т. 223. – С. 383-400.
- [4] Zhou W. et al. Thermal performance of ultra-thin flattened heat pipes //Applied Thermal Engineering. – 2017. – Т. 117. – С. 773-781.

- [5] Shioga T., Mizuno Y., Nagano H. Operating characteristics of a new ultra-thin loop heat pipe //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – T. 151. – C. 119436.
- [6] Zhou W. et al. A novel ultra-thin flattened heat pipe with biporous spiral woven mesh wick for cooling electronic devices //Energy Conversion and Management. – 2019. – T. 180. – C. 769-783.
- [7] Zhou W. et al. Ultra-thin flattened heat pipe with a novel band-shape spiral woven mesh wick for cooling smartphones //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2020. – T. 146. – C. 118792.
- [8] Chen G. et al. Heat transfer characteristic of an ultra-thin flat plate heat pipe with surface-functional wicks for cooling electronics //International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2019. – T. 100. – C. 12-19.
- [9] Wang Q., Hong J., Yan Y. Biomimetic capillary inspired heat pipe wicks //Journal of Bionic Engineering. – 2014. – T. 11. – №. 3. – C. 469-480.
- [10] Li J. et al. Mechanism of a microscale flat plate heat pipe with extremely high nominal thermal conductivity for cooling high-end smartphone chips //Energy conversion and management. – 2019. – T. 201. – C. 112202.
- [11] Zhang S. et al. Experimental study on the thermal performance of a novel ultra-thin aluminum flat heat pipe //Renewable Energy. – 2019. – T. 135. – C. 1133-1143.
- [12] Yao C. et al. Thermal performance of a micro heat pipe array for battery thermal management under special vehicle-operating conditions //Automotive Innovation. – 2020. – T. 3. – C. 317-327.
- [13] Li Y. et al. Thermal responses of heat pipes with different wick structures under variable centrifugal accelerations //Applied Thermal Engineering. – 2016. – T. 96. – C. 352-363.
- [14] Tharayil T. et al. Effect of nanoparticle coating on the performance of a miniature loop heat pipe for electronics cooling applications //Journal of Heat Transfer. – 2018. – T. 140. – №. 2.
- [15] Ling Y. Z. et al. Performance study of phase change materials coupled with three-dimensional oscillating heat pipes with different structures for electronic cooling //Renewable Energy. – 2020. – T. 154. – C. 636-649.
- [16] Sardarabadi H. et al. Experimental investigation of a novel type of two-phase closed thermosyphon filled with functionalized carbon nanotubes/water nanofluids for electronic cooling application //Energy Conversion and Management. – 2019. – T. 188. – C. 321-332.

[17] Xu R. et al. Heat transfer performance of pulsating heat pipe with zeotropic immiscible binary mixtures //International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2019. – Т. 137. – С. 31-41.

[18] Ramkumar P. et al. An experimental inquisition of waste heat recovery in electronic component system using concentric tube heat pipe heat exchanger with different working fluids under gravity assistance //Microprocessors and Microsystems. – 2021. – Т. 83. – С. 104033.

[19] Sun X. et al. A thermoelectric cooler coupled with a gravity-assisted heat pipe: An analysis from heat pipe perspective //Energy Conversion and Management. – 2018. – Т. 155. – С. 230-242.

[20] Zeghari K., Louahlia H., Le Masson S. Experimental investigation of flat porous heat pipe for cooling TV box electronic chips //Applied Thermal Engineering. – 2019. – Т. 163. – С. 114267.

[21] Werner T. C. et al. Experimental analysis of a high temperature water heat pipe for thermal storage applications //Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – Т. 19. – С. 100564.

[22] Wang X. et al. A general method to predict the performance of closed pulsating heat pipe by artificial neural network //Applied Thermal Engineering. – 2019. – Т. 157. – С. 113761.

[23] Wikimedia commons[Электронный ресурс]. – 2023 – Режим доступа: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ALaptop\\_CPU\\_Heat\\_Pipe\\_Cross\\_Section.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ALaptop_CPU_Heat_Pipe_Cross_Section.jpg) – Дата доступа: 07.05.2023.