

УДК 536.423.4; 621.565.83

## НАПРАВЛЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОТЫ В ТЕРМОСИФОНАХ

Петерс А.Н., аспирант ТЭа-201, Темникова Е.Ю., доцент кафедры ТЭ,  
Богомолов А.Р., зав кафедрой ТЭ

Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

Одним из типов теплообменного оборудования являются тепловые трубы и их подвид – термосифоны. Принцип работы заключается в переносе тепловой энергии от источника тепла, при помощи рабочего вещества в полости трубы с запаянными концами.

Конструктивно теплообменник-термосифон – это герметично закрытый объем трубы, заполненный внутри специально подобранным легкокипящим рабочим веществом. Один конец трубы в горячем потоке нагревается, рабочее вещество в этом месте кипит и передает воспринятое тепло на другой конец трубы, обдуваемый холодным потоком. Здесь рабочее вещество внутри трубы конденсируется и передает тепло холодному потоку, который нагревается. В таких теплообменниках полностью исключены взаимное смешивание потоков, их загрязнение и передача запахов. Подвижных элементов нет, трубы в потоки помещают только вертикально либо под небольшим уклоном, чтобы рабочее вещество двигалось внутри труб от холодного конца к горячему за счет силы тяжести (рис. 1).

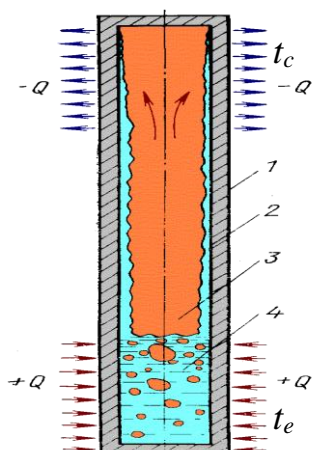


Рисунок 1 – Термосифон:  
1 – стенка; 2 – конденсат;  
3 – пар;  
4 – кипящая жидкость

Общая стройная теория процессов теплопереноса на данный момент не в полной мере разработана, так как необходимо учесть большой комплекс физических процессов, протекающих в зонах испарения и конденсации, в паровом канале, движущейся пленке конденсата.

Несмотря на обилие конкурентных теплообменных систем, термосифон остаётся весьма перспективным устройством, изучение и исследования которых проводят до сих пор [1-4]. Авторы [3], утверждают, что основным преимуществом термосифонных теплообменников, является низкая энергозатратность. Кроме этого, яркой чертой этого вида теплообменников является простота устройства и автономный принцип работы. Именно автономность, является ключевым аспектом, качественно

выделяющим термосифоны, в отличие от других теплообменных систем. Но несмотря на такой весомый плюс, как независимость от электроэнергии, термосифоны не нашли большой популярности в промышленных системах. Согласно [3] основной причиной этого является недостаточно изученная физика совместно протекающих процессов теплопроводности, конвекции и фазовых превращений в термосифоне. И с этим утверждением трудно не согласиться.

При тщательном рассмотрении системы теплообмена термосифона, взгляду открываются множество факторов, влияющие на работоспособность, такие как: рабочее вещество термосифона, степень заполнения, наличие воздуха в термосифоне, наличие вакуума, теплопроводность стенки термосифона, температурный режим работы, источник тепла и многое другое. Но, несмотря на перечисленные выше особенности, данный вид теплообменников используется в промышленности и имеет высокий потенциал для изучения [1, 5].

На данный момент, двухфазный термосифон принято делить на две или три зоны: зона испарения, зона конденсации, и транспортная зона. Последняя зона имеет место быть в, условно, больших по длине теплообменниках или теплообменников, задачей которых, стоит в отводе тепловой энергии на значительное расстояние. Основным критерием, определяющим эффективность работы термосифона, служит низкое термическое сопротивление. Термическое сопротивление зависит от интенсивности теплоотдачи в зонах испарения и конденсации. За полвека исследований и модернизаций двухфазный термосифон нашёл применение в самых различных сферах деятельности человека. Как в промышленности, так и в ЖКХ. На многих промышленных предприятиях имеются огромные потери тепловой энергии, связанные с технологическими процессами предприятий, в окружающую среду.

Из-за агрессивности и загрязненности многих источников теплоты при использовании традиционных теплообменных аппаратов, например, для ее непосредственной передачи потребителю, возникает ряд проблем, связанных, в первую очередь, с надежностью и безопасностью. В то же время термосифоны, как показали результаты их применения в таких условиях, являются достаточно эффективными. Например, в производстве экстракционной фосфорной кислоты для терморегулирования экстрактора в пределах от 80 до 110°C (в зависимости от типа проводимой реакции) и выделением около 20 МВт теплоты, использование термосифонных теплообменников позволяет передавать ее непосредственно в систему теплоснабжения предприятия и оказывает существенное влияние на экономию электроэнергии и экологическую безопасность.

За всё время развития термосифонного теплообменника, были проведены многочисленные опыты и научные изыскания для определения самых оптимальных параметров работы данного устройства.

В [3] приводятся уравнение для определения минимальной степени заполнения, имеются рекомендации по соотношению диаметра к длине испарительной части, экспериментальные значения и расчетные зависимости по плотности предельного теплового потока для некоторых рабочих веществ, которые определяют предельную теплопередающую способность термосифона, что в свою очередь позволит создать надежный, высокоэффективный теплообменник, сократить металлоемкость. Также представлен анализ результатов по кризисам теплопереноса при кипении жидкости и обобщение данных по конденсации паров. Подобные исследования описаны К.Ю. Ушаковым и др., рассмотрены различные режимы работы термосифона при изменяемых входных параметрах, по теплоносителю и рабочим параметрам. Выявлено наилучшее соотношение уровня заполнения теплообменника и соотношение размеров испарительной зоны к конденсационной для медного термосифона, имеющего высоту трубки 300 мм, внутренним диаметром 18 мм и заполненным фреоном R141В, с температурой кипения 32°C.

В [6] предложена методика расчета полного термического сопротивления термосифона, но не даны рекомендации по определению коэффициентов теплоотдачи при кипении и конденсации в термосифоне, предложено определить их экспериментально для конкретного теплоносителя.

Авторы в [7] представили расчет термосифона для охлаждения лопаток высокотемпературной паровой турбины, которым имеется возможность воспользоваться с учетом замены центробежной составляющей на гравитационную.

Имеются численные решения – математическое моделирование процессов теплопереноса в двухфазном термосифоне [2], в том числе с использованием пакета ANSYS FLUENT.

Наибольшее распространение получили термосифоны не с торцевым подводом/отводом теплоты, а с боковой поверхности термосифона, поэтому процессы тепло- и массопереноса такого термосифона характеризуются внутренней полостью, а не процессом на наружной поверхности.

В настоящее время принято общее представление о внутренних процессах. В зависимости от количества залитого рабочего жидкого тела в нижней зоне подвода теплоты, внутреннего диаметра термосифона (трубы) и плотности теплового потока на стенке возможно осуществление двух режимов работы, которые отличаются качественно друг от друга:

– пленочный режим стекания конденсата на внутренней поверхности трубы в области конденсации;

– двухфазный режим рабочего тела как в области кипения, транспортной зоны и области конденсации.

Для первого режима отметим важное обстоятельство. Пленочный режим обеспечивается балансом между количеством помещенного теплоносителя (рабочего тела) и вносимым тепловым потоком к нему для

процесса парообразования. В таком случае пленка жидкости распределена по всей внутренней боковой поверхности термосифона и в нижней части (область подвода теплоты) отсутствует избыток жидкости (рабочего тела).

Второй режим имеет прямую зависимость от уровня заливки рабочего тела в термосифоне и по данным из литературных источников колеблется в пределах 0,3–0,8 долей. Обратим внимание, что двухфазный режим в термосифонах качественно отличается в зависимости от геометрии труб. В небольшом диаметре термосифона движение паровой фазы из испарительной области в зону конденсации осуществляется в снаряжном режиме, а в достаточно большом диаметре происходит всплывание отдельных пузырьков паровой фазы без объединения их в большие размеры паровых пузырей в виде снарядов. Можно позволить сравнение этого режима как кипение в большом объеме, т.е. парообразование в объеме. В связи с этим это режим считают барботажным.

Исследователи считают, что наиболее востребованным и чаще встречаемым в опытах, режим двухфазного рабочего тела.

Для описания тепло- и массообменных процессов, происходящих в двухфазном термосифоне, используем закон сохранения энергии передачи теплоты теплопроводностью через стенку термосифона в области кипения и конденсации, а также конвективную составляющую процесса кипения и конденсации в соответствующих областях термосифона.

Для анализа и постановки задач по исследованию закономерностей влияния существенных обстоятельств на повышение эффективности термосифона запишем основное уравнение теплопередачи для установившегося режима при заданных температурах рабочего тела в жидком и парообразном состоянии, известных данных по теплопроводности стенки  $\lambda$  термосифона и ее толщине  $\delta$  в условиях температур, указанных на рис. 1:

$$Q = (t_e - t_c) \left( \frac{\delta}{\lambda F_e} + \frac{1}{\alpha_e F_e} + \frac{\delta}{\lambda F_c} + \frac{1}{\alpha_c F_c} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $Q$  – тепловой поток, переносимый от горячего источника к холодному в пределах конструкции термосифона, т.е. из области кипения рабочего тела в область его конденсации при условии баланса подвода и отвода теплоты соответствующими источниками, Вт;  $\alpha_e, \alpha_c$  – коэффициенты теплоотдачи при кипении и конденсации рабочего тела, соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_e, F_c$  – поверхности подвода и отвода теплоты в зонах кипения и конденсации, соответственно, м<sup>2</sup>.

Второй член произведения правой части, поставленный в знаменатель, отражает полное термическое сопротивление термосифона. При расчете теплового потока по зависимости (1) необходимо произвести расчет  $\alpha_e, \alpha_c$ . Для конкретного теплоносителя коэффициенты теплоотдачи должны быть определены экспериментально. Известно [6], что при двухфазном режиме работы термосифона, т.е. при интенсивном кипении рабочего тела и тепловых

потоках  $q > 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> коэффициент теплоотдачи при кипении  $\alpha_e$  в среднем на 30% больше, чем для условий кипения в большом объеме.

Кроме того, отметим, что коэффициента теплоотдачи при кипении на порядок выше, чем при пленочной конденсации. Таким образом, анализируя зависимость (1), следует разрабатывать конструктивные и технологические мероприятия, повышающие коэффициент теплоотдачи на стороне поверхности конденсации  $\alpha_c$ .

Программа исследований предполагает проведение исследований, направленных на увеличении внутренней поверхности конденсации рабочего тела в термосифоне по (1) и одновременному созданию условий капельной конденсации на внутренней его поверхности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов, Г. В. Режимы смешанной конвекции в замкнутом двухфазном термосифоне цилиндрической формы / Г.В. Кузнецов, М.А. Аль-Ани, М.А. Шеремет // Известия ТПУ. – 2011. – Т. 318. № 4. – С. 18-23.
2. Аль-Ани, М. А. Особенности гидродинамики и тепломассопереноса в термосифонах для использования в теплоэнергетическом оборудовании: дис. ... к-та техн. наук: 05.14.14, 01.04.14: защищена 01.07.11 - Томск, 2011. – 142 с.
3. Безродный, М. К. Процессы переноса в двухфазных термосифонных системах. Теория и практика / М.К. Безродный, И.Л. Пиоро, Т.О. Костюк. – Киев: Факт, 2005. – 704 с.
4. Нурпейис А.Е. Экспериментальное исследование и математическое моделирование процессов теплопереноса в замкнутых двухфазных термосифонах. Томск-2019 дис. ... к-та техн. наук: 05.14.04:-Томск, 2019. – 157 с.
5. Исакеев А.И., Киселев И.Г., Филатов В.В. Эффективные способы охлаждения силовых полупроводниковых приборов. – Л.: Энергоиздат, Ленинградское отделение, 1982.
6. Промышленные тепломассообменные процессы и установки / А.М. Бакластов, В.А. Горбенко, О.Л. Данилов [и др.]; под ред. А.М. Бакластова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.
7. Bogomolov, A.R. Thermosyphon Method For Cooling The Rotor Blades Of High-Temperature Steam Turbines / A.R. Bogomolov, E.Yu Temnikova // EPJ Web of Conferences, 2016, 01009, Vol. 110 (2016), Thermophysical Basis of Energy Technologies 2015, Tomsk, Russia, October 13-15, 2015, Published online: 22 Feb. 2016. – DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201611001009> – Article available at <http://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/abs/2016/05/contents/contents.html>