

УДК 536.422

Экспериментальное исследование параметров пародинамического термосифона, предназначенного для терморегулирования сорберов аккумуляторов и теплотрансформаторов

А. П. Цитович, Л. Е. Канончик

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь;
e-mail: atsitovich@hmti.ac.by*

Поступила в редакцию 14.11.2017

Представлены результаты экспериментов по определению параметров пародинамического термосифона с миниатюрным U-образным теплообменником. Данный термосифон предназначен для терморегулирования сорберов аккумуляторов газа и теплотрансформаторов. Приведены характеристики полученной системы терморегулирования сорберов. Описаны процессы, происходящие в системе во время различных стадий работы установки. На основании полученных данных сделаны выводы о преимуществах выбранной конструкции термосифона перед имеющимися конструкциями.

Ключевые слова: сорбент, пародинамический термосифон, термосифон, теплообменник, теплотрансформатор, аккумулятор газа.

Введение

Одной из возможностей улучшения характеристик и потребительских свойств газовых аккумуляторов и теплотрансформаторов является применение двухфазных теплопередающих устройств (тепловых труб и термосифонов). Основной фактор повышения эффективности работы сорбционных элементов энергетических установок – обеспечение равномерного и быстрого нагрева/охлаждения объема сорбента [1]. Решение этой задачи тесно связано с разработкой системы терморегулирования на основе пародинамического термосифона.

Пародинамические термосифоны, созданные в лаборатории пористых сред Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, имеют следующие характерные особенности [2–4]:

– способность транспортировать большие тепловые потоки при малых температурных перепадах благодаря высоким значениям коэффициентов теплопередачи – 10^3 – 10^5 Вт/(м К);

– возможность обеспечить быстрый нагрев/охлаждение сорбента в сорбере в нестационарных режимах;

– гибкость в конструктивном исполнении при размещении внутри сорбера, небольшой вес и надежность.

В работе рассматривается усовершенствованная конструкция пародинамического термосифона со встроенным внутрь конденсатора миниатюрным U-образным теплообменником пар–жидкость. Экспериментально исследуются особенности процессов тепло- и массообмена в таких термосифонах, предназначенных для терморегулирования сорберов аккумуляторов и теплотрансформаторов.

1. Описание установки

Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования процессов тепло- и массообмена в пародинамическом термосифоне в составе сорбера показана на рис. 1. Она включает блок терморегулирования и нагрева, состоя-

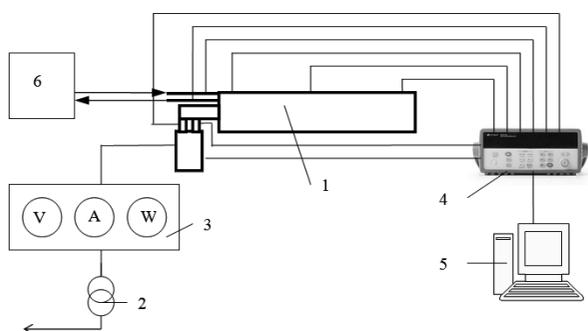


Рис. 1. Принципиальная схема установки: 1 – сорбент с системой терморегулирования на основе пародинамического термосифона; 2 – трансформатор Ferrix; 3 – измерительный комплект K50; 4 – Agilent Data Logger HP-34970A; 5 – ПК; 6 – термостат U10

щий из термостата U10, трансформатора Ferrix, комплекса определения подводимой электрической мощности; а также блок измерения температуры (Agilent Data Logger HP-34970A, термопары и ПК). Основные узлы экспериментальной установки связаны между собой системой паровых и жидкостных трубопроводов с установленными на них вентилями. Объект исследования – усовершенствованная конструкция пародинамического термосифона (с встроенным миниатюрным теплообменником) как элемент системы терморегулирования сорбента аккумулятора газообразного аммиака или теплотрансформатора (рис. 2).

В качестве рабочей жидкости термосифона и миниатюрного теплообменника использовалась вода, материал корпусов – нержавеющая сталь. Геометрические параметры конструкции следующие: диаметр сорбента – 50 мм, длина сорбента – 1000 мм; диаметр испарителя – 40 мм, высота цилиндрической части испарителя – 90 мм; диаметры коаксиальных трубок (с толщиной стенки 1 мм) конденсатора пародинамического термосифона – 16 мм и 8 мм. В кольцевой канал конденсатора термосифона встроен миниатюрный теплообменник в виде U-образной трубки с диаметром 4 мм и толщиной стенки 0.5 мм. Конденсатор вмонтирован в сорбент таким образом, что его корпус окружен кольцевым слоем сорбирующего наполнителя. Общая длина исследуемой конструкции – 1060 мм, ширина – 50 мм, высота – 190 мм.

Основная задача данного исследования состояла в определении теплопередающих характеристик пародинамического термосифона, дополненного миниатюрным теплообменником, в составе

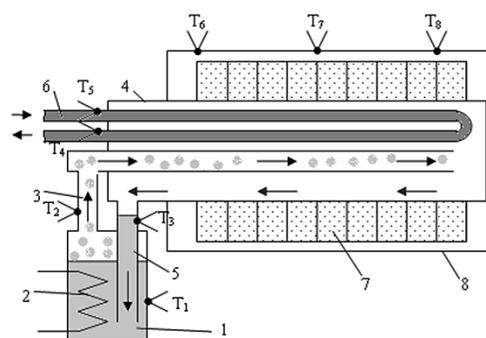


Рис. 2. Схема сорбента с системой терморегулирования на основе усовершенствованного пародинамического термосифона, T_1 – T_8 – термопары

терморегулируемого сорбента теплотрансформатора. Работа теплотрансформатора на твердых сорбентах происходит по двум циклам. Первый цикл – нагрев сорбента, второй цикл – охлаждение сорбента.

2. Результаты экспериментальных исследований

2.1. Первый цикл (нагрев)

Источником тепловой энергии для нагрева пародинамического термосифона (см. рис. 2) является миниатюрный электрический нагреватель 2, размещенный в испарителе 1. При подводе теплоты к испарителю термосифона происходит испарение (кипение) рабочей жидкости. Образующийся пар по паровому каналу 3 переходит в конденсатор пародинамического термосифона 4, прогревая его и сорбент 7 по всей длине, и поступает в кольцевой зазор, где конденсируется с образованием парожидкостной смеси. Конденсат затем сливается по жидкостному каналу в испаритель. Во время нагрева сорбента миниатюрный U-образный теплообменник 6, расположенный внутри конденсатора термосифона, отключен (отсутствует подача рабочей жидкости). Температура измерялась восемью хромель-алюмелевыми термопарами (погрешность ± 1.5 °C).

Картина изменения характерных температур испарителя T_1 и сорбента $T_{\text{сор}}$, температур парового T_2 и жидкостного каналов в термосифоне T_3 в начале цикла нагрева показана на рис. 3. Температура сорбента считалась равной среднеарифметическому значению показаний термопар на его поверхности:

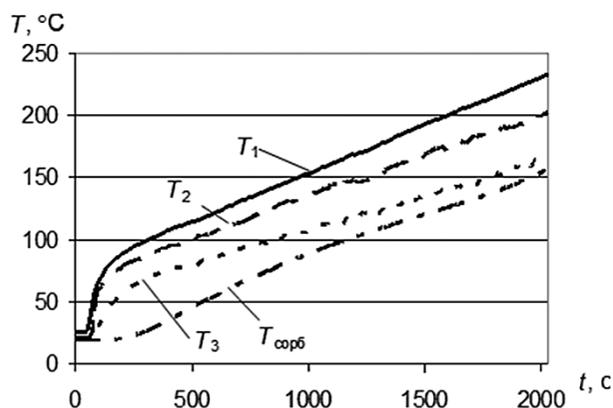


Рис. 3. Изменение температуры в различных частях пародинамического термосифона в процессе нагрева сорбента: T_1 – температура испарителя; T_2 – температура парового канала; T_3 – температура жидкостного канала; $T_{сorb}$ – средняя температура сорбента

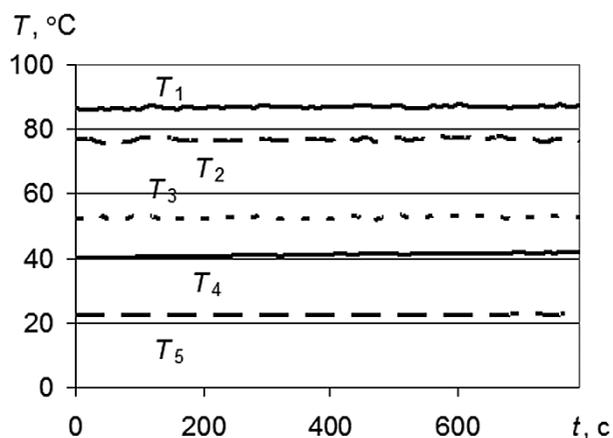


Рис. 4. Распределение температуры в экспериментальном сорбере с пародинамическим термосифоном при подводимой электрической мощности 500 Вт. T_1 – температура испарителя; T_2 – температура парового канала; T_3 – температура жидкостного канала; T_4 – температура на выходе жидкости из теплообменника; T_5 – температура на входе теплообменника

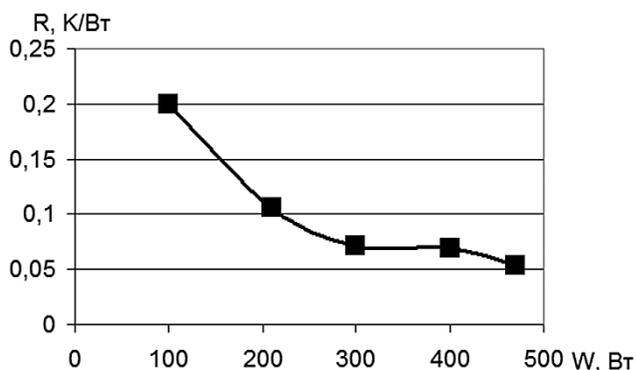


Рис. 5. Изменение термического сопротивления пародинамического термосифона в зависимости от электрической мощности нагревателя

$$T_{сorb} = (T_6 + T_7 + T_8)/3.$$

Здесь T_7 соответствовала температуре в середине сорбера, а T_6, T_8 – температурам в точках, удаленных от начала и конца сорбера на 50 мм. Эксперимент проводился для сухого сорбента и адиабатических условий на внешней поверхности сорбера. При наступлении стационарного периода работы установки в цикле нагрева U-образный теплообменник исполняет роль конденсатора в пародинамическом термосифоне. Рис. 4 иллюстрирует установившиеся значения температуры, которые соответствуют показаниям термопар (см. рис. 2) и применяются далее при расчете характеристик теплопередающего устройства.

Для определения КПД U-образного теплообменника, расположенного внутри конденсатора пародинамического термосифона, необходимо найти изменение температуры теплоносителя при прохождении через U-образный теплообменник и величину теплового потока Q , передаваемого от испарителя термосифона:

$$\text{КПД} = cG(T_4 - T_5)/Q, \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К); G – массовый расход теплоносителя, кг/с; T_4, T_5 – температуры теплоносителя на выходе и входе U-образного теплообменника, К; Q – тепловой поток, Вт.

Анализ экспериментальных данных показал, что тепловой поток, передаваемый от испарителя пародинамического термосифона к U-образному теплообменнику, равнялся подводимой электрической мощности и не превышал 500 Вт. Соответствующая величина КПД U-образного теплообменника имела среднее значение 0.85.

Термическое сопротивление пародинамического термосифона рассчитывалось следующим образом:

$$R = (T_1 - T_{кон})/Q, \quad (2)$$

где $T_{кон}$ – температура конденсатора, К; R – термическое сопротивление, К/Вт. Температура конденсатора принималась равной среднеарифметическому значению температур парового и жидкостного каналов, входящих в конденсатор:

$$T_{кон} = (T_4 + T_3)/2.$$

Зависимость термического сопротивления пародинамического термосифона R от величины

передаваемого теплового потока представлена на рис. 5. Наличие изгиба кривой сопротивления показывает, что при больших тепловых нагрузках в кольцевом зазоре происходит изменение режима конденсирующегося двухфазного потока.

Конденсат может перекрыть все поперечное сечение кольцевого зазора между внутренней и наружной стенками конденсатора. В результате площадь режима пленочной конденсации, благоприятной для теплообмена, сокращается. Однако движущийся поток продвигает границу раздела пар–жидкость далее, снова открывая поверхность для конденсации, что позволяет системе продолжать сохранять работоспособность и при больших тепловых нагрузках.

2.2. Второй цикл (охлаждение)

После завершения стадии десорбции в сорбере начинается цикл охлаждения и адсорбции, которым предшествует выключение электрического нагрева испарителя пародинамического термосифона и подача на вход U-образного теплообменника, расположенного внутри конденсатора термосифона, охлаждающей жидкости (рис. 6).

Поскольку сорбент имеет более высокую температуру, чем стенка U-образного теплообменника, конденсатор пародинамического термосифона, расположенный в сорбере, становится источником тепловыделения. Таким образом, после окончания цикла нагрева сорбента стенка конденсатора является, по сути, источником теплоты для нагрева и испарения жидкости в кольцевом зазоре ($t \leq 100$ с).

Образующийся пар конденсируется на более холодной поверхности U-образного теплообменника. Направление движения рабочей жидкости в конденсаторе пародинамического термосифона меняется с продольного, относительно оси сорбера, на поперечное. Капли конденсата под действием силы тяжести падают на внутреннюю поверхность горизонтально расположенного конденсатора термосифона, скапливаясь в нижней его части (рис. 7). В этот период процесс теплообмена между жидкостью в конденсаторе и стенкой U-образного теплообменника протекает подобно циклу работы коаксиальной тепловой трубы.

Охлаждение сорбера сопровождается рядом физических процессов как в пародинамическом термосифоне, так и в U-образном теплообменнике (рис. 8). В начале цикла высокая темпера-

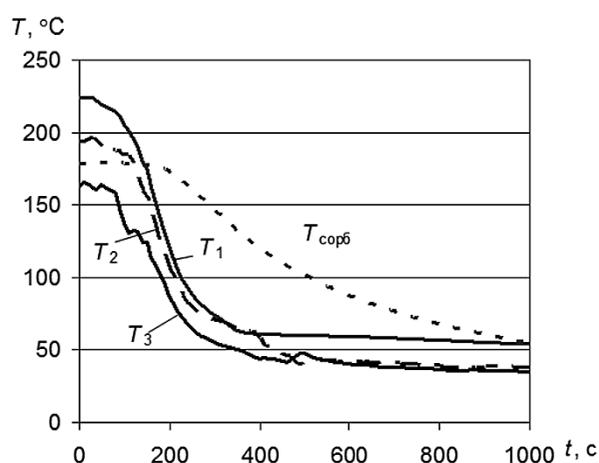


Рис. 6. Изменение температуры в различных частях сорбера с пародинамическим термосифоном во время охлаждения: $T_{\text{сорб}}$ — температура сорбера; T_1 — температура испарителя; T_2 — температура парового канала; T_3 — температура жидкостно-го канала

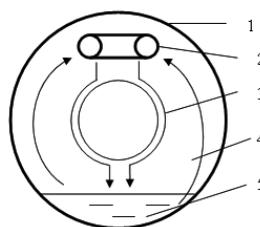


Рис. 7. Движение теплоносителя в поперечном сечении конденсатора пародинамического термосифона во время фазы охлаждения: 1 — внешняя стенка конденсатора; 2 — U-образный теплообменник; 3 — движение каплей конденсата; 4 — движение пара; 5 — жидкий конденсат

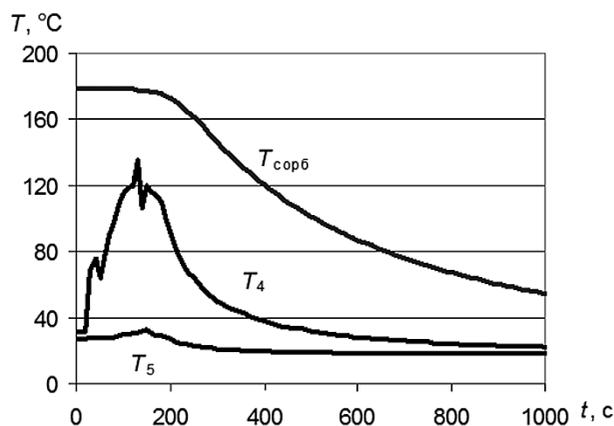


Рис. 8. Изменение температуры в U-образном теплообменнике и на поверхности сорбера во время охлаждения: $T_{\text{сорб}}$ — температура сорбера; T_4 — температура воды на выходе из теплообменника; T_5 — температура воды на входе в теплообменник

тура сорбента приводит к интенсивному испарению жидкости. Образующийся пар полностью блокирует проход воды через охлаждающий контур, и на выход теплообменника поступает только паровая фаза.

Затем режим испарения сменяется кипением жидкости, которое сопровождается движением двухфазной пароводяной смеси и силь-

ными пульсациями давления и температуры внутри U-образного теплообменника. В результате пар лишь частично перекрывает движение охлаждающей жидкости через теплообменник ($100 < t < 200$ с).

Далее ($t > 200$ с) наблюдается бесшумная работа U-образного теплообменника, обусловленная перемещением однофазного потока жидкости. Сорбент в сорбере продолжает охлаждаться до температуры, близкой к температуре жидкости. На этом цикл заканчивается, и сорбент готов к поглощению очередной порции газа.

Выводы

Измерены характеристики пародинамического термосифона, дополненного миниатюрным U-образным жидкостным теплообменником, при работе в составе системы терморегулирования сорбера газового аккумулятора или теплотрансформатора на твердых сорбентах.

Система терморегулирования сорбера, выполненная на базе пародинамического термосифона и миниатюрного теплообменника, позволяет не только равномерно нагревать, не допуская локальных перегревов, но также быстро и равномерно охлаждать сорбент до нужной температуры,

тем самым существенно повышая эффективность работы теплотрансформатора или аккумулятора. Таким образом, полученное устройство обладает всеми преимуществами обычных пародинамических термосифонов и имеет дополнительную возможность эффективного охлаждения наиболее нагретых зон сорбента, которые находятся у поверхности конденсатора термосифона.

Реализация быстрых циклов в теплотрансформаторах дает возможность направлять тепло на нужные цели до того, как оно рассеется в окружающей среде, повышая мощность таких установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Васильев Л. Л., Канончик Л. Е.** Организация активного сорбционного объема терморегулируемой системы хранения водородсодержащего газа // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5. № 3. С. 124–130.
2. **Alyousef Y., Antukh A. A., Tsitovich A. P., Vasiliev L. L.** Three adsorbers solar cooler with composite sorbent bed and heat pipe thermal control // Applied Thermal Engineering. 2012. V. 38. P. 124–130.
3. **Vasiliev L. L., Vasiliev L. L. Jr.** Heat transfer enhancement using heat pipes and thermosyphons with nanotechnologies // Proceedings of 11 International Heat Pipe Symposium. June 9–12, 2013. Beijing, China, 2013. P. 37–47.
4. **Vasiliev L. L., Grakovich L. P., Rabetsky M. I., Vasiliev L. L. Jr., Zhuravlyov A. S.** Thermosyphons with innovative technologies // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 111. P. 1647–1654.

Experimental study of vapor-dynamic thermosyphon for thermal regulation of accumulators and thermal transformers thermal control

A. P. Tsitovich, L. E. Kanonchik

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk, Belarus
e-mail: atsitovich@hmti.ac.by*

The paper describes a new vapor-dynamic thermosyphon with a long condenser and miniature U-shaped heat exchanger. The thermosyphon serves to thermal control of gas accumulators and heat transformers sorbers (heat pumps, refrigerators etc.). Sorbers' thermal control allows obtaining large amounts of retained gas in gas accumulators and fast cycles in heat transformers with higher heat fluxes.

The total length of the setup is 1060 mm, with the height of 190 mm and width of 50 mm. The outer diameter of the thermosyphon condenser is 16 mm. The U-tube outer diameter is 4 mm. The setup material is stainless steel, and the coolant is water.

The article describes the processes occurring in the system while the setup's operation.

At the phase of heating, the system operates like a conventional vapor-dynamic thermosyphon. From the evaporator the vapor enters the condenser where it releases heat to the sorbent material at the condenser wall. Then the condensed liquid returns to the condenser due to the gravity force. The design of the vapor-dynamic thermosyphon allows low temperature difference along the surface of the condenser wall.

At the phase of cooling, the heat passes from the condenser wall to the U-shaped tube in radial direction. Then the U-shaped tube draws the heat off the system in the longitudinal direction. If

the initial temperature of the cooling phase is high, then the short-term coolant blocking may occur at the beginning of this phase.

The experiments reveal that the thermosyphon operates successfully at thermal loadings up to 500 W and temperatures up to 260 °C. The effectiveness of the U-tube heat exchanger is 0.85. Thermal resistance of the thermosyphon is within the range of 0.05–0.2 K/W. The sorber heating time is 2000 s, and cooling time is 1000 s.

Based on the data obtained, conclusions were made on the advantages of a new thermosyphon over conventional systems. A U-shaped tube inclusion into the condenser of vapor-dynamic thermosyphon allows heat transfer not only in one direction as in conventional thermosyphon. A high heat transfer allows also employ short cycles in gas accumulators charging, and higher heat transformers effectiveness with short operation cycles.

Keywords: sorbent, vapor-dynamic thermosyphon, thermosyphon, heat exchanger, heat transformers, gas accumulator.

REFERENCES

1. **Vasil'ev L. L., Kanonchik L. E.** Organizaciya aktivnogo sorbcionnogo ob'ema termoreguliruemoy sistemy hraniya vodorodsoderzhashchego gaza [Organization of an active sorption volume of temperature-controlled storage system of hydrogenous gas]. *Teplovye processy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2013, vol. 5, no. 3, pp. 124–130. In Russ.
2. **Alyousef Y., Antukh A. A., Tsitovich A. P., Vasiliev L. L.** Three adsorbers solar cooler with composite sorbent bed and heat pipe thermal control. *Applied Thermal Engineering*, 2012, vol. 38, pp. 124–130.
3. **Vasiliev L. L., Vasiliev L. L. Jr.** Heat transfer enhancement using heat pipes and thermosyphons with nanotechnologies. *Proceedings of 11 International Heat Pipe Symposium. June 9–12, 2013. Beijing, China*, 2013, pp. 37–47.
4. **Vasiliev L. L., Grakovich L. P., Rabetsky M. I., Vasiliev L. L. Jr., Zhuravlyov A. S.** Thermosyphons with innovative technologies. *Applied Thermal Engineering*, 2017, vol. 111, pp. 1647–1654.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ ЧИТАТЕЛЕЙ

XXV Всероссийский семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям

11–14 сентября 2018 года, г. Санкт-Петербург

Всероссийский семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям проводится уже более шестидесяти лет. В его работе принимают участие учебные, проектные, научно-исследовательские и промышленные организации, занимающиеся фундаментальными и прикладными проблемами механики жидкости, газа и плазмы.

На семинаре будут обсуждаться новые результаты теоретических, численных и экспериментальных исследований в области механики течений жидкости, газа и плазмы, а также их практические приложения в авиационной и ракетно-космической технике, в энергетике, экологии, обеспечении безопасности человека, в других областях науки и отраслях экономики.

Научные направления семинара

1. Стационарные течения в струях и следах
2. Отрывные течения, проблемы аэродинамики и тепломассопереноса
3. Нестационарные течения, аэро- и гидроакустика
4. Течения в соплах и каналах, внутренняя баллистика
5. Ударно-волновые и взрывные процессы, взаимодействие газодинамических разрывов
6. Многофазные течения
7. Неравновесные течения и процессы, горение и детонация
8. Динамика разреженных газов
9. Технологические приложения, экологические проблемы и средства обеспечения безопасности
10. Вычислительные аспекты механики жидкости, газа и плазмы

Рабочие языки семинара – русский и английский.

URL: <http://www.voenmeh.ru/science/conferences/gasjets>

E-Mail: kapralovaa@yahoo.com

mvcher@mail.ru