

Труды МАИ. 2022. № 126
Trudy MAI, 2022, no. 126

Научная статья
УДК 533.69.01
DOI: [10.34759/trd-2022-126-13](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-13)

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

СТЕНД ЗАПРАВКИ ТЕПЛОВЫХ ТРУБОК

**Нэлли Саидовна Диняева¹, Сергей Борисович Кравцов²,
Сергей Олегович Крумляков³, Георгий Аркадьевич Бенкалюк⁴**

^{1,2,3,4}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

²hdtv321@mail.ru

Аннотация. В работе рассматривается разработка специального устройства - стенда для заправки жидким теплоносителем плоских тепловых трубок, а также метода их заправки, основанного на регулируемом перетекании под действием гравитации охлаждающей жидкости во внутреннем пространстве тепловых трубок (ТТ).

Охлаждающая жидкость (ОЖ), применяемая для заливки в тепловые трубки, предварительно обрабатывается – из нее удаляются растворенные газы. Дегазация охлаждающей жидкости производится с целью минимизации процесса окисления внутренних металлических частей корпуса и испарительной капиллярно-пористой структуры (ИКС) ТТ.

С целью повышения эффективности процесса заправки опытных партий

тепловых трубок, сокращения материальных и временных затрат предложено специальное устройство – заправочный стенд, объединяющий в единый технологический цикл все технологические операции, которые осуществлялись отдельно.

Дегазация осуществляется методом ультразвуковой (УЗ) кавитации в специальной емкости, установленной в УЗ ванне, являющийся составной частью заправочного стенда.

Реализация данной разработки позволяет получить полезный результат, который состоит в:

- экономии трудозатрат за счет сокращения количества технологических операций и конструктивных особенностей установки;

- повышении надежности герметизации ТТ связанной с возможностью визуального контроля за всем технологическим циклом заправки;

- увеличении глубины дегазации ОЖ, что в свою очередь влияет на продление срока службы заправленных ТТ;

- снижение вероятности выхода из строя РЛС за счет увеличения надежности системы охлаждения ППМ АФАР;

- возможности производства в сжатые сроки опытных партий ТТ для дальнейших исследований.

Ключевые слова: тепловые трубки, заправочный стенд, ультразвуковая дегазация, заправка теплоносителем, приемопередающий модуль, охлаждающая жидкость

Для цитирования: Диняева Н.С., Кравцов С.Б., Бенкалюк Г.А., Крумляков С.О. Стенд

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

Original article

STAND FOR FILLING HEAT PIPES

Nelly S. Dinyaeva¹, Sergey B. Kravtsov², Sergey O. Krumlyakov³,

Georgy A. Benkalyuk⁴

^{1,2,3,4}Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

²hdtv321@mail.ru

Abstract. The paper considers the development of a special device - a stand for filling flat heat pipes with a liquid coolant, as well as a method for filling them, based on controlled flow under the influence of gravity of the coolant in the internal space of heat pipes (HPs).

The coolant (coolant) used for pouring into heat pipes is pre-treated - dissolved gases are removed from it. The degassing of the coolant is carried out in order to minimize the process of oxidation of the internal metal parts of the case and the evaporative capillary-porous structure (ECS) of the HP.

In order to increase the efficiency of the process of filling experimental batches of heat pipes, reduce material and time costs, a special device is proposed - a filling stand that combines all technological operations that were carried out separately into a single technological cycle.

Degassing is carried out by ultrasonic (US) cavitation in a special container installed in an ultrasonic bath, which is an integral part of the filling stand.

The implementation of this development allows you to get a useful result, which consists in:

- saving labor costs by reducing the number of technological operations and design features of the installation;

- increasing the reliability of HP sealing associated with the possibility of visual control over the entire technological cycle of refueling;

- an increase in the depth of coolant degassing, which in turn affects the extension of the service life of filled HP;

- reducing the probability of failure of the radar by increasing the reliability of the cooling system PPM AFAR;

- possibility of production in a short time of pilot batches of HP for further research.

Keywords: heat pipes, filling stand, ultrasonic degassing, coolant filling, transceiver module, coolant

For citation: Dinyaeva N.S., Kravtsov S.B., Benkalyuk G.A., Krymliakov S.O. Stand for filling heat pipes. *Trudy MAI*. 2022, no. 126. DOI: [10.34759/trd-2022-126-13](https://doi.org/10.34759/trd-2022-126-13)

Введение

Тематика статьи относится непосредственно к авиа и ракетостроению, а также к системам радиолокации и навигации.

В настоящее время, практически все летательные аппараты оснащены системами радиолокации и радионавигации. Основой радиолокационных систем являются электронные блоки, в том числе и блоки приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток, которые нуждаются в охлаждении [1].

Системы жидкостного охлаждения ППМ активных фазированных антенных решеток (АФАР) в соответствии с новыми, изменяющимися техническими требованиями к системам радиолокации, применяемой современной электронной базой и новыми технологическими возможностями, требуют проведения постоянных конструкторско-технологических работ по их совершенствованию. Повышаются требования к конструкции систем охлаждения электронных блоков. Для этого необходим анализ большого количества испытаний электронных блоков с перспективными системами охлаждения, в том числе на основе ТТ с ИКС.

Охлаждающая система, создаваемая для ТТ, в составе блоков радиолокационных систем, работающих в диапазонах дециметровых, сантиметровых и миллиметровых длин волн должна обеспечивать эффективный отвод тепловой энергии от ППМ АФАР до 250-300 Вт [2-5].

В зависимости от частотного диапазона АФАР, габаритных размеров блоков ППМ, мест расположения тепловыделяющих элементов в блоке ППМ, прочих его конструктивных особенностей, плоские ТТ могут иметь различные геометрические размеры, разную конфигурацию и выполнены из различных материалов.

Актуальность теме придаёт тот факт, что с целью проработки возможности использования данных охлаждающих систем, необходимо иметь наработанную

базу данных по проведенным исследованиям и экспериментам. Для этого необходимо иметь необходимое количество опытных образцов ТТ отечественного производства [4].

В настоящий момент выпуск ТТ с ИКС охлаждения на отечественных предприятиях не налажен и для проведения экспериментов приходится использовать ТТ импортного производства. Однако, данная продукция, рассчитанная на применение в “домашних условиях” для систем охлаждения ноутбуков и другой бытовой техники, для применения в изделиях “спецтехники” использована быть не может.

Как правило, стандартные ТТ ИКС изготавливаются из меди или её сплавов, и имеют прямоугольную форму с внешними габаритами от 50x50 мм до 120x300 мм и толщину, не превышающую 5-6 мм [5,10].

Внутри корпуса плоской ТТ расположена пористая ИКС - фитиль, изготовленная методом аддитивных технологий из металлического или керамического порошка, или мелкая металлическая сетка [6-8].

Для каждого типа ППМ АФАР требуется индивидуальная конфигурация ТТ, поэтому они экспериментально производятся ограниченным количеством и каждая трубка заполняется теплоносителем вручную или на изготовленных стендах для заливки, позволяющих заправлять одно изделие [4].

При этом, технологическая операция по подготовке (дегазация) жидкого теплоносителя производится отдельно от операций по заправке ТТ. Они разнесены во времени и по рабочим зонам.

Для заправки мелкосерийных партий плоских ТТ, в лабораторных условиях может использоваться метод шприцевания. Данный метод имеет ряд недостатков, а именно:

- необходимость применения дорогостоящего оборудования для точного введения заправочной иглы в заправочный штуцер;

- возможность насыщения газом охлаждающей жидкости в процессе заливки;

- необходимость дополнительных перемещений, монтажа/демонтажа и жесткого крепления на каждом этапе работ для каждого заправляемого изделия, что влечет за собой его удорожание.

Перечисленные выше причины обусловили постановку задачи по разработке устройства и технологии оптимизирующих сам процесс заправки и минимизирующих возможные повреждения ТТ во время его проведения [10].

С целью совершенствования процесса заправки ТТ разработано специальное устройство – заправочный стенд, целью которого является обеспечение надёжной заправки ТТ необходимым количеством подготовленного теплоносителя и гарантированное обеспечение герметичности корпуса ТТ после заправки.

Актуальность разработки стенда заправки заключается в том, что он позволяет осуществлять полный технологический цикл заправки ТТ ОЖ с его предварительной дегазацией в рамках единого технологического процесса на одном рабочем месте, избегая промежуточных перемещений изделия из одной зоны в другую и необходимых в этом случае технологических операций по установке, фиксации, подключению и отключению от систем подачи жидкости, откачки газа и

т.д. Кроме того, разработанное устройство (заправочный стенд) может позволить производить заправку ТТ теплоносителем небольшими партиями (до 10 шт), что сокращает время их заправки, обеспечивает надежность герметизации.

Теоретическое обоснование метода заправки

Данная статья является результатом углублённого анализа данных об исследованиях проведённых в лабораториях и научно-исследовательских подразделениях МАИ (НИУ) в рамках Федеральной целевой программы посвящённый изучению возможности применения плоских ТТ с ИКС для охлаждения ППМ фазированных антенных решёток (ФАР).

Учитывая высокую теплоотводящую способность плоских ТТ (до 300 Вт), малые габариты и вес, отсутствие необходимости внешнего подключения к источникам питания и теплоносителя, высокую их ремонтпригодность, ИКС оказалась эффективной для охлаждения блоков ППМ АФАР радиолокационных комплексов [11].

Основным рабочим элементом плоских ТТ является ИКС (фитиль), выполненная из пористого материала - керамического или металлического порошка (ПМС-1) с размерами частиц от 4,5 до 50 Мкм [8], расположенными во внутреннем объеме полого корпуса ТТ. Работоспособность ТТ обеспечивается определённым количеством жидкого теплоносителя, его составом и внутрикорпусным давлением воздуха (или инертного газа). Важным является инертность жидкого теплоносителя, которая обеспечивает замедление процессов окисления внутренних корпусных элементов ТТ [12-14].

Конструкционные особенности структура и состав ИКС, а также материал изготовления ТТ, являются определяющими для выбора метода её заправки [8].

Промышленная технология, равно как и оборудование для производства опытных образцов плоских ТТ в России не отработаны, что затрудняет процесс исследования в области перспективных систем охлаждения [15]. Разработанный и описываемые в данной работе заправочный стенд и предложенная технология заправки ТТ жидким дегазированным теплоносителем позволяют осуществлять заправку ТТ в лабораторных условиях с минимальными временными и материальными издержками и могут послужить прототипом при разработке высокотехнологичного оборудования с необходимой производительностью.

Основным условием при выборе методы заправки являются:

- правильный выбор жидкого теплоносителя [12];
- необходимый/достаточный объем жидкого теплоносителя, заправляемый в ТТ;
- обеспечение расчётного уровня вакуума заправленной теплоносителем ТТ;
- обеспечение возможности заполнения тела ТТ инертным газом;
- специальная обработка (дегазация) ОЖ проводимая вне корпуса ТТ (в специальной ёмкости);
- осуществление перелива ОЖ в корпус ТТ в ламинарном режиме за счёт использования сил гравитации [17];
- обеспечение визуального контроля со стороны оператора, за всеми этапами заправки ТТ;
- минимизация операции подключения/отключения и перемещения заправляемых ТТ

к системам заливки с обязательной фиксацией изделия;

-обеспечение возможности производить одновременную заправку нескольких тепловых трубок разных конструкций и различных габаритов;

-возможность изменения параметров УЗ поля при изменении требований к ОЖ.

При выборе жидкого теплоносителя проведены исследования по определению физических свойств различных охлаждающих жидкостей [12]. При этом сравнивались физические показатели антифриза АWM С11/Glisanin G48 и ОЖ-65 - раствора этиленгликоля содержащего различные добавки. При сравнение физических показателей и уровня цены был выбран теплоноситель ОЖ-65 [5].

T, K	$T, ^\circ C$	$P*10^3,$ бар	$\nu*10^6,$ м ² /с	$\rho,$ кг/м ³	$\beta*10^4,$ 1/К	$C_p,$ Дж/(кг*К)	$\lambda,$ Вт/(м*К)	$\alpha*10^6,$ м ² /с	Pr
213	-60	—	2371,0	1143	6,15	2390	0,315	0,115	20600
233	-40	2,5	222,4	1129	6,22	2542	0,317	0,110	2020
273	0	7,2	14,6	1102	6,38	2847	0,329	0,105	139
293	20	16,7	6,3	1089	6,45	2999	0,337	0,103	61,2
313	40	50,4	3,3	1076	6,50	3151	0,343	0,101	32,7
333	60	133,6	2,0	1062	6,58	3303	0,359	0,101	19,8
353	80	309,8	1,3	1048	6,65	3455	0,361	0,0994	13,1
373	100	647,9	0,99	1034	6,75	3608	0,363	0,0973	10,2

393	120	1261,2	0,78	1011	6,92	3760	0,362	0,0953	8,18
-----	-----	--------	------	------	------	------	-------	--------	------

Таблица 1. Теплофизические свойства антифриза 65.

В таблице представлены следующие свойства антифриза: давление пара антифриза P , кинематическая вязкость ν , плотность антифриза ρ , коэффициент объемного расширения β , удельная теплоемкость C_p , коэффициент теплопроводности λ , температуропроводность a , число Прандтля Pr .

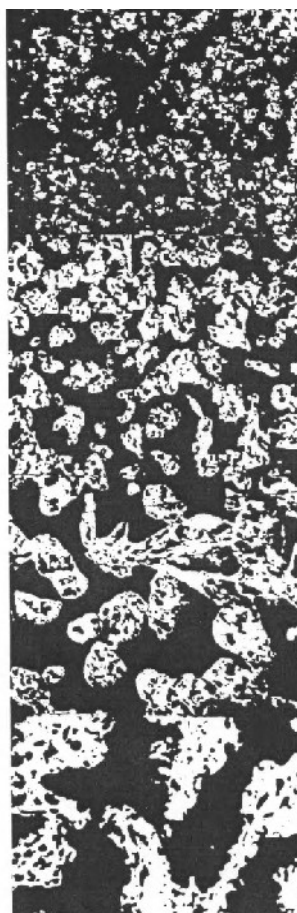


Рис 1 – Многослойная ИКС из порошка меди ПМС-Н

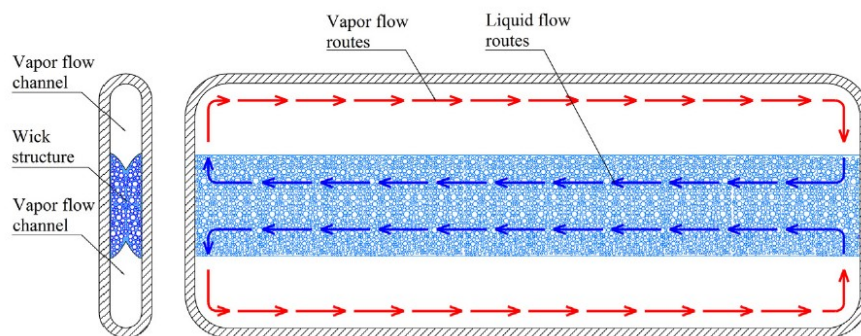


Рисунок 2 - Схема работы ультратонкой тепловой трубки. Зона испарения – слева. Зона конденсации – справа. Пар проходит в каналах, не занятых пористым фитилем. Сконденсировавшаяся жидкость возвращается обратно в горчюю зону по пористому фитилю за счет капиллярных сил. Тепловая трубка работает только за счет подвода тепла от охлаждаемого объекта.

Данные приведенные в Таблице 1 были подтверждены результатами испытаний физических свойств ОЖ-65, проведенных в лабораториях института нефтехимического синтеза РАН, на дифференциальном сканирующем калориметре DSC823 Mettler Toledo и института прикладной механики РАН на реометре RheoStress RS150.

Пористая испарительно-конденсационная структура фитиля выполнена по методу аддитивной технологии на 3D принтере и имеет неоднородное строение, обеспечивающие движение жидкости к её поверхностному слою за счёт сил поверхностного натяжения [7]. Фитиль, имеющий структуру сквозных пор, обеспечивает ламинарное движение жидкого теплоносителя от разогретой внутренней стенки ТТ к зоне испарения. Испарившаяся с поверхности фитиля ОЖ

конденсируется на противоположной (более холодной) внутренней стороне корпуса ТТ и под действием гравитационных сил стекает на нагретую внутреннюю поверхность ТТ, создавая при этом постоянный теплообмен [10-18].

Проведённые исследования показали, что наибольшей глубины дегазации в лабораторных условиях удаётся достигнуть при использовании метода ультразвуковой обработки жидкости [4]. По глубине очистки от растворенных в ОЖ газов указанный метод сравним с методом дегазации в аппаратах атмосферного типа, однако является менее энерго и время затратным.

Тип деаэратаора	Абсолютное рабочее давление, МПа	Остаточное содержание растворенных газов, мкг/кг	
		СО ₂	О ₂
ДВ	0,015-0,08	Отсутствует	50
ДА	0,11-0,13	Отсутствует	20
ДП	0,6-1,0	Не нормируется	10

Таблица 2. Сравнительная таблица глубины дегазации различными методами.

(дегазация в аппаратах вакуумного (ДВ) и атмосферного (ДА) типов и в дегазаторах повышенного давления (ДП))

Экспериментально показано, что использование перечисленных способов позволяет снизить содержание газов в ОЖ, однако глубина дегазации достигается при этом недостаточная.

Проведенные в этой области исследования и сравнительный анализ показали, что из простейших методов (без использования специального оборудования) наиболее эффективной является ультразвуковая дегазация жидкости [18]. Этот способ и был изучен и использован при проектировании заправочного стенда.

Известен способ УЗ дегазации ОЖ, уже залитой во внутренний объём корпуса ТТ [18]. Однако, проведенные экспериментальные исследования показали малую пригодность этого метода. Это связано с низкой прочностью структуры фитиля, который в целях повышения эффективности испарения изготовлен по аддитивной технологии, а именно методом спекания микро шариков из металла или керамики [19]. При резком повышении внутри корпусного давления, вызванного “вскипанием” ОЖ под действием УЗ поля, капиллярно пористая структура фитиля может разрушиться, а герметичность самого корпуса ТТ повреждена [20].

Авторами предложен и теоретически обоснован способ дегазации, который не нарушает структуры ТТ. При этом процесс УЗ дегазации производится в специальной ёмкости, установленной в ванной УЗ очистки.

При использовании устройства дегазации ОЖ с использованием ультразвуковой обработки необходимым условием является возможность изменять параметры акустических колебаний [21]. Эта потребность возникает при замене специальной ёмкости с охлаждающей жидкостью (при увеличении объёма заправляемой охлаждающей жидкости), замены самой охлаждающей жидкости, при изменении материала фитиля тепловой трубки (например замена металлической пудры, на керамический пористый материал), и других изменениях [22].

Такая возможность в изменении частоты генерируемых колебаний и их мощностей представлена за счет системы регулировки режимов работы ультразвуковой ванны. Опытным путём показано, что оптимальными параметрами УЗ обработки ОЖ-65 для ТТ ИКС из медного порошка являются физическими параметрами УЗ поля:

-время акустического облучения ≈ 20 мин;

-частота УЗ генератора ≈ 20 кГц;

-мощность УЗ генератора 500 Вт.

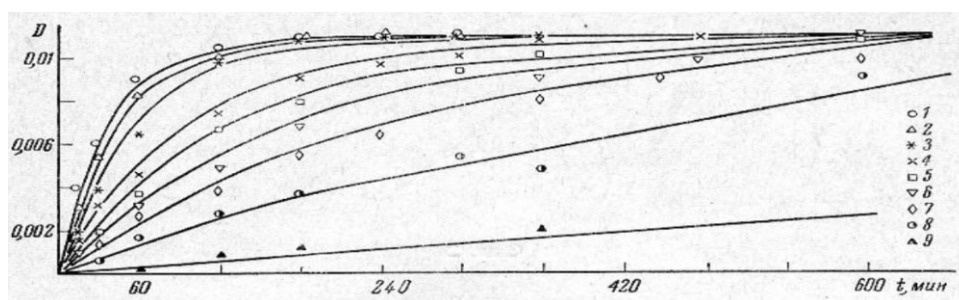


Рисунок 3 - Глубина дегазации при использовании ультразвукового метода, где D — степень дегазации, t — время озвучивания, a — коэффициент дегазации.

При проведении пробных заправок плоских ТТ в лаборатории ПАО “Радиофизика” двумя методами: шприцеванием и с использованием макета заправочного стенда. Были получены данные, свидетельствующие о различиях в трудозатратах и затратах рабочего времени на осуществление полного технологического цикла описываемого процесса.

Сравнение результатов замеров рабочего времени приведено в таблице:

Техно-логический процесс	№ Операции и временные затраты (мин)																Суммарные временные затраты (мин)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1*	5	4	3	-	1,5	1,5	3	1,5	4	3	2	-	4	-	2,5	2	38,5
2*	5	4	-	1,5	-	1,5					2,5	1,5	3,5	2,5	2,5	2	26,5

Таблица 3. Временные затраты.

*- Без дополнительной операции по заполнению ТТ инертным газом.

-Расчеты проведены для заправки 1 изделия.

Технологический процесс:

1-Шприцевания;

2-На заправочном стенде.

Операция 1 - подготовительные операции для заправки одного изделия;

Операция 2 - время установки и крепления одного изделия;

Операция 3 - заправка шприца;

Операция 4 - заполнение гидروвакуумной раздаточной системы в пересчете на 1 изделие;

Операция 5 - прицеливание (шприц в заправочной патрубке);

Операция 6 - заполнение тела ТТ охлаждающей жидкостью (на одно изделие);

Операция 7 - демонтаж от ТТ системы шприцевания;

Операция 8 - перемещение ТТ от системы шприцевания к системе вакуумирования;

Операция 9 - крепления ТТ в системе вакуумирования;

Операция 10 - подключение вакуумной трубки системы вакуумирования заправочного штуцера;

Операция 11 - пережимание выпускного патрубка ТТ;

Операция 12 - переключение ГВР системы на режим вакуумирования;

Операция 13 - вакуумирование (для первого технологического процесса до 0,45 бар, для второго технологического процесса до 0,5 бар);

Операция 14 - нагрев ТТ в термошкафу (для второго технологического процесса в пересчете на 1 изделие);

Операция 15 - пережимание заправочного штуцера;

Операция 16 - демонтаж одного изделия.

Сравнительный анализ показал, что временные затраты при использовании разработанного метода заправки на заправочном стенде позволяют снизить временные затраты на 45%.

Установка для заправки плоских тепловых трубок

Установка для заправки тепловых трубок состоит из:

- специального термошкафа с температурный режимом от -10 до +100 °С (1);
- ванны ультразвуковой очистки (2) с установленной в ней ёмкостью для ОЖ (3)
- ;
- выпускного патрубка (4), соединяющего емкость с ОЖ (3) и гидро-вакуумную раздаточную систему (ГВРС) (7);

патрубок, 5-Вакуумный насос, 6-Манометр раздаточной системы, 7- Гидроваакумная раздаточная система, 8-Тепловые трубки, 9-Балон с нейтральным газом, 10-Кассетные держатели ТТ, 11-Воздухоотводные трубки, 12-проходной вентиль, 13-Мерные сосуды раздаточной системы)

Разработанная конструкция заправочного стенда и методика осуществления последовательности операции призваны обеспечить:

- свободный, контролируемый перелив охлаждающей жидкости в режиме ламинарного потока из ёмкости (3) во внутрикорпусное пространство ТТ (8), при этом объём заливаемой жидкости должен составлять не более 45% внутреннего объёма заправляемых трубок (при температуре +20°C);
- осуществление глубокой дегазации охлаждающей жидкости за счёт двойного цикла ее обработки – дегазации в УЗ ванне (2) и дополнительном нагревании заправляемых ТТ в термошкафу (1);
- повышенную надежность герметизации за счет отказа от операции монтажа/демонтажа при смене рабочих зон;
- гарантированное соблюдение регламента заправки тепловых трубок за счет визуального и инструментального контроля оператором.

Технология заправки ТТ на заправочном стенде

Проведенный анализ существующих и применяемых технологических приемов по заправке ТТ жидким теплоносителем показал, что на отдельных предприятиях, производящих опытные партии плоских тепловых трубок, подготовка к

технологическим операциям по дегазации охлаждающей жидкости, сама дегазация, а так же все операции по непосредственной заправке ТТ, производятся в разных рабочих зонах, что требует многократных перемещений изделия. В результате, время полного технологического цикла заправки одного изделия может составлять от 35 до 65 минут. При этом, многократно увеличивается риск случайного нарушения герметичности ТТ и как следствие - попадание воздуха внутрь корпуса заправляемого изделия.

Известны мероприятия, связанные с заправкой ТТ, при которых ультразвуковая дегазация ОЖ производится непосредственно в корпусе ТТ после ее заливки [9]. Однако, как показали проведенные испытания, дегазация ОЖ в плоских ТТ с ИКС не желательна, так как при незначительных превышениях параметров частоты и мощности УЗ поля, возможно нарушение капиллярно пористой структуры фитиля вплоть до его разрушения. Особенно это касается ИКС, изготовленных по аддитивным технологиям (методом напыления или послойного лазерного синтеза). Разработанная и описываемая ниже технология заправки, позволяет избежать указанных недостатков.

Разработанные заправочный стенд и метод заправки обладают полезными свойствами:

- осуществление полного технологического цикла по заправке ТТ, включая ультразвуковую дегазацию ОЖ на специальном стенде, в рамках единого технологического цикла;
- исключение негативного воздействия путём отказа от многократного перемещения

изделия из одной технологической зоны в последующую;

- сокращение количества операций по монтажу/демонтажу заправляемого изделия и, как следствие – сокращение временных и материальных затрат на заправку одного изделия;

- возможность осуществлять визуальный контроль за всем технологическим циклом одним оператором;

- осуществление более глубокой дегазации ОЖ;

- возможность одновременной заправки несколько ТТ с различными габаритами и разной конфигурацией;

Совокупность полезных свойств, позволяет повысить технологичность процесса и достигнуть полезного результата:

- Сделать технологический процесс экономически более эффективным;

- Избежать нарушения герметичности заправляемого изделия;

- Дополнительно, при необходимости, производить операцию по заполнению внутреннего объёма корпуса ТТ инертным газом.

- За счет использования УЗ дегазации, достигнуть более глубокой очистки ОЖ от содержащихся в ней окислителей.

Перечисленные полезные свойства позволяют утверждать, что использование заправочного стенда предлагаемой конструкции с включенным в него состав устройством УЗ очистки охлаждающей жидкости, является весьма надежными и экономически более эффективным, при производстве опытных партий (от 10 до 1000 единиц).

Порядок осуществления операции по заправке ТТ

1. Жидкий теплоноситель заливается в емкость (3), установленную в УЗ ванну (2).
2. УЗ ванна включается на рабочий режим (например: время обработки 15 мин., частота УЗ излучения 20 кГц, акустическая мощность УЗ генерации 250 Вт).
3. Заправляемые ТТ (8) размещаются в кассетных держателях (10), так что бы заправочные штуцера и воздухоотводящие трубки (11) оказались сверху, обеспечивая свободное перетекание ОЖ в ламинарном режиме;
4. Заливные трубки надеваются на заправочные штуцера;
5. После окончания процесса обработки жидкости, УЗ ванна отключается. Производится перелив жидкости из ёмкости (3), через впускной патрубков (4) в гидровакуумную систему путем открытия верхнего вентиля (12);
6. Мерные сосуды раздаточной системы заполняются обработанной ОЖ;
7. Перелив жидкости из мерных сосудов ГВРС производится за счет открывания вентиля 6 при открытых воздухоотводящих трубках (11) тепловых трубок ;
8. После окончания процесса переливания ОЖ в ТТ включается нагрев термошкафа (1) до температуры +85°C;
9. По достижению температуры +85 °С термошкаф выключается, воздухоотводящие трубки ТТ пережимаются при помощи специальной струбины и обламываются;
10. Открывается вентиль (6) вакуумного насоса (5) при открытых вентилях ГВРС (6).
11. Происходит откачка воздуха из ТТ до уровня 0,5 Бар, после чего вентиль ГВРС перекрывается;

12. Заправочные штуцеры ТТ пережимаются, обламываются и герметизируются.

Герметизация проводится методом ручной пайки припоем ПОИН-52);

13. Заправки ТТ закончена*.

* При необходимости возможно заполнение тела ТТ инертным газом (азот). Для этого вакуумирование производится до уровня 0,3-0,35 Бар и в разогретые до +85°C трубки закачивается из ёмкости (9) газ до показателя 0,5 Бар на манометрах ГВРС. После чего газоотводящие трубки и штуцеры перекрываются указанным выше способ.

Выводы

Проведённый анализ результатов данного исследования позволяет сделать вывод о том, что разработанный стенд заправки и соответствующие технологии заправки полностью отвечают поставленной задаче:

- позволяет осуществлять эффективный контроль за всем технологическим циклом;
- позволяет производить заправку одновременно нескольких изделий с различными размерами и конфигурацией без дополнительных изменений структуры стенда и его доработки;
- позволяет дополнительно производить операцию по заполнению внутри корпусного пространство ТТ инертным газом;
- обеспечивает значительную экономию трудовых затрат и рабочего времени на заправку ТТ;
- позволяет осуществлять дополнительно 100% визуальный контроль за всем технологическим циклом;

Данная система может служить прототипом оборудование, разрабатываемым для реализации заправки опытных партий тепловых трубок в количествах от 100 до 1000 единиц, как в лабораторных условиях, так и на производственных площадках.

Практическая реализация предложенной технологии позволит продвинуться в исследовании перспективных систем охлаждения электронных блоков, в том числе применяемых в системах радиолокации и радионавигации, самолетостроения и ракетостроения. Применение тепловых трубок данного типа, значительно сокращает массогабаритные параметры систем радиолокации и радионавигации при значительном увеличении их эффективности.

Список источников

1. Авдудевский В.С., Кошкин В.К. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. - М.: Машиностроение, 1992. - 528 с.
2. Невокшенов А.В., Поляков П.О., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О., Тушнов П.А. Приемно-передающий модуль активной фазированной антенной решетки Ка-диапазона с двухступенчатой системой охлаждения // Патент на полезную модель № RU 196690 U1, 20.03.11.
3. Никитин А.Д., Ивлиев А.С. Возможные способы управления выходной мощностью усилительных модулей на базе приборов М-типа // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164265>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-14)
4. Невокшенов А.В., Шестаков О.В., Тушнов П.А. Моделирование производственного цикла изготовления ППМ АФАР при постановке на серийное

производство // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 10. С. 19-29. DOI: [10.18127/j00338486-202110-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202110-03)

5. Поляков П.О., Токмаков Д.И., Горюнов Р.В., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О. Применение плоских тепловых труб для охлаждения приемо-передающих модулей активных фазированных антенных решеток // XVII Всероссийская молодежная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии» (Москва, 5 декабря 2019): сборник трудов. – М.: Изд-во «Мир науки», 2019. С. 106-109.

6. Поляков П.О., Соляев Ю.О., Рабинский Л.Н., Токмаков Д.И., Смольникова О.Н. Приемно-передающий модуль АФАР с теплоотводящим основанием в виде плоской тепловой трубки // Патент на полезную модель RU 189664 U1, 30.05.2019.

7. Поляков П.О., Соляев Ю.О., Рабинский Л.Н., Токмаков Д.И., Смольникова О.Н. Корпус приемно-передающего модуля активной фазированной антенной решетки, изготовленной методом послойного лазерного синтеза // Патент на полезную модель № RU 190821 U1, 15.07.2019.

8. Шестаков Р.С., Карипов Д.М., Галимов Д.Р., Карипов А.Л. Исследование некоторых физических свойств фитилей, получаемых спеканием дисперсного порошка меди в конструкциях термосифонов и тепловых трубок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallургия. 2015. Т. 15. № 3. С. 148–153.

9. Гинин В.Н., Силина Ф.А., Воскресенский С.С., Сляднева Г.М. Способ дегазации теплоносителя // Авторское свидетельство SU 1175521 A1, 30.08.1985.

10. Городнов А.О., Лаптев И.В. Влияние теплоемкости стенки на рост давления и

температурное расслоение при тепловой конвекции паров водорода в вертикальной цилиндрической емкости // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=121008>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-02](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-02)

11. Добрянский В.Н., Рабинский Л.Н., Радченко В.П., Соляев Ю.О. Оценка ширины зоны контакта между плоскоовальными каналами охлаждения и корпусом приёмно-передающего модуля активной фазированной антенной решётки // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98252>

12. ГОСТ 28084-89. Жидкости охлаждающие низкотемпературные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2007. -16 с.

13. Хатунцева О.Н. О нахождении обобщенного аналитического решения задачи Хагена-Пуазейля для турбулентного режима течения жидкости // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158211>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-02](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-02).

14. Вин Ко Ко, Темнов А.Н. Теоретическое исследование эффектов колебаний двух несмешивающихся жидкостей в ограниченном объеме // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159776>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-03](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-03)

15. Краузина М.Т., Сидоров А.С., Буркова Е.Н. Использование магнитной жидкости в качестве теплоносителя в системах охлаждения в условиях космического полета // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118883>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-06](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-06).

16. Скворцов С.П. Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации // Наука и образование. 2015. № 2. С. 83-100.

17. Федюшкин А.И., Пунтус А.А. Нелинейные особенности ламинарных течений жидкости на Земле и в невесомости // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=98751>
18. Марчинский А.С., Туч А.В., Громова И.Н. и др. Способ дегазации жидкости и устройство для его осуществления // Патент на полезную модель SU 956937 А1, 05.15.1992.
19. Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Аддитивные технологии для авиакосмической техники // Аддитивные технологии. 2016. № 1. С. 30-38.
20. Пожалостин А.А., Гончаров Д.А. О параметрических осесимметричных колебаниях жидкости в цилиндрическом сосуде // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=84412>
21. Казаков В.А., Сенюев И.В. Измерение распределения температуры на поверхности образца при испытаниях в тепловых аэродинамических трубах // Труды МАИ. 2017. № 94. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=81065>

References

1. Avduevskii V.S., Koshkin V.K. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoi i raketno-kosmicheskoi tekhnike* (), Moscow, Mashinostroenie, 1992, 528 p.
2. Nevokshenov A.V., Polyakov P.O., Rabinskii L.N., Solyaev Yu.O., Tushnov P.A. *Patent na poleznuyu model' RU 196690 U1*, 20.03.11.
3. Nikitin A.D., Ivliev A.S. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164265>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-14)

4. Nevokshenov A.V., Shestakov O.V., Tushnov P.A. *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 10, pp. 19-29. DOI: [10.18127/j00338486-202110-03](https://doi.org/10.18127/j00338486-202110-03)
5. Polyakov P.O., Tokmakov D.I., Goryunov R.V., Rabinskii L.N., Solyaev Yu.O. *XVII Vserossiiskaya molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i svyaz' – perspektivnye tekhnologii»*: sbornik trudov. Moscow, Izd-vo «Mir nauki», 2019, pp. 106-109.
6. Polyakov P.O., Solyaev Yu.O., Rabinskii L.N., Tokmakov D.I., Smol'nikova O.N. Priemno-peredayushchii modul' AFAR s teplootvodyashchim osnovaniem v vide ploskoi teplovoi trubki // Patent na poleznuyu model' RU 189664 U1, 30.05.2019.
7. Polyakov P.O., Solyaev Yu.O., Rabinskii L.N., Tokmakov D.I., Smol'nikova O.N. *Patent na poleznuyu model' RU 190821 U1*, 15.07.2019.
8. Shestakov R.S., Karipov D.M., Galimov D.R., Karipov A.L. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya*, 2015, vol. 15, no. 3, pp. 148–153.
9. Ginin V.N., Silina F.A., Voskresenskii S.S., Slyadneva G.M. *Avtorskoe svidetel'stvo SU 1175521 A1*, 30.08.1985.
10. Gorodnov A.O., Laptev I.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 116. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121008>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-02](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-02)
11. Dobryanskii V.N., Rabinskii L.N., Radchenko V.P., Solyaev Yu.O. *Trudy MAI*, 2018, no. 101. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98252>
12. *Zhidkosti okhlazhdayushchie nizkozamerzayushchie. Obshchie tekhnicheskie usloviya GOST 28084-89* (Liquids cooling low-freezing. General specifications. GOST 28084-89), Moscow, Standartinform, 2007, 16 p.

13. Khatuntseva O.N. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158211>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-02](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-02).
14. Vin Ko Ko, Temnov A.N. *Trudy MAI*, 2021, no. 119. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159776>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-03](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-03)
15. Krauzina M.T., Sidorov A.S., Burkova E.N. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118883>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-06](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-06).
16. Skvortsov S.P. *Nauka i obrazovanie*, 2015, no. 2, pp. 83-100.
17. Fedyushkin A.I., Puntus A.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 102. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=98751>
18. Marchinskii A.S., Tuch A.V., Gromova I.N. et al. *Patent na poleznuyu model' SU 956937 A1*, 05.15.1992.
19. Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. *Additivnye tekhnologii*, 2016, no. 1, pp. 30-38.
20. Pozhalostin A.A., Goncharov D.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84412>
21. Kazakov V.A., Senyuev I.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 94. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=81065>

Статья поступила в редакцию 22.04.2022

Статья после доработки 24.04.2022

Одобрена после рецензирования 13.05.2022

Принята к публикации 12.10.2022

The article was submitted on 22.04.2022; approved after reviewing on 13.05.2022; accepted for publication on 12.10.2022