

## ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ПРОБЛЕМА ИХ РЕСУРСА

Бурдо О.Г., Смирнов Г.Ф., Терзиев С.Г.

*Одесская национальная академия пищевых технологий, г.Одесса, Украина*

**1. Введение.** В [1-2] представлены результаты исследований совместимости 42 сочетаний теплоносителей и материалов корпуса и фитиля в широком диапазоне температур: от криогенной до высокотемпературной области. К числу несовместимых [1-4] относят пары: "алюминий - вода", "медь - аммиак", "алюминий - метанол". Основным физико-химическим процессом, влияющим на надежность ТТ, является процесс электрохимической коррозии. Интенсивность реакции определяется сочетанием материала ТТ и теплоносителя. Выделение водорода - основная причина выхода из строя стальных тепловых труб, работающих на воде [6-5]. Успешно обобщил данные [7] по генерации водорода Бейкер [9-8], используя модель Аррениуса. Зависимость скорости реакции  $F$  от обратной абсолютной температуры есть прямая линия [9-8].  $M(\tau, T) = f(\tau)F(T) = f(\tau)const \exp(-E/kT)$  (1)

где  $f(\tau)$ - функция времени,  $F(T)$  - коэффициент смещения Бейкера;  $E$  - энергия активации реакции, Дж;  $k$ - постоянная Больцмана, Дж/К. Комплексный подход к процессу газовой выделению в низкотемпературных тепловых трубах предпринят в работах [10-11], в них выделены и подробно рассмотрены три основных фактора, влияющих на количество выделившегося газа в тепловой трубе: 1) термическая диссоциация; 2) химическое растворение конструкционного материала в рабочей жидкости; 3) электрохимическая диссоциация теплоносителя. Анализ показал, что газовыделение за счет термической диссоциации воды ничтожно мало. Достаточно удобная для практики модель газовыделения в связи с недостаточной определенностью входящих параметров затруднена в применении. Поэтому предлагается упрощенная формула, например, для системы "нержавеющая сталь - вода" [12,13]:  $m = m_{\infty} \exp(-E/kT)$ , (2) где  $m_{\infty}$  константа массовой скорости выделившегося водорода при температуре, стремящейся к бесконечности. В работе [14] подтверждена возможность определения скорости газовыделения по формуле (2). Представительные исследования ресурсных характеристик ТТ из нержавеющей стали, работающих на воде, проведены в [15 – 18]. Процессы газообразования в ТТ при длительной эксплуатации представлены в виде:

$$Z_1 = A \exp(-B/T) \quad (3)$$

где

$$A = 0,5 j \rho_T D^{0,5} \quad (4)$$

$$B = 0,5 E/R \quad (5)$$

$$Z_i = \frac{(P_i - P_c) \mu V \tau^{0,5}}{(T_i - T_c) R T_c F [1 - I_0(T_i - T_0)/(T_i - T_c)]} \times \left[ \frac{P_i G (T_i - T_0)}{T_i^2 (P_i - P_c)} - \frac{T_i - T_0}{T_i - T_c} + 1 \right], \quad (6)$$

В соотношении (6) :  $P$  - давление насыщения водяного пара;  $\mu$  - молярная масса газа;  $V$  - объем конденсатора ТТ;  $l_0$  и  $l$  - длина конденсатора и ТТ;  $\rho$  - плотность окисной пленки;  $j$  - коэффициент, связывающий количество твердых и газообразных продуктов, образовавшихся при коррозии;  $G$  - константа зависимости, описывающей кривую насыщения водяного пара. Поскольку, целью исследований [15 – 18] было повышение стабильности характеристик ТТ за счет применения ингибиторов, то в дальнейшем модель (5 – 8) усложнялась учетом ингибиторного эффекта.

## 2. Организация и методика ресурсных испытаний тепловых труб.

Проблема организации ресурсных испытаний ТТ достаточно сложна и трудоемка. Длительность натурных испытаний (десятки тысяч часов) определяет необходимость четкой планировки экспериментов тщательного осмысливания методики. Опыт ресурсных испытаний [1-7,12-22] накоплен для ТТ систем охлаждения аппаратуры. Особое внимание следует уделить взаимодействию испытуемой ТТ с окружающей средой. Рассматривались два метода организации испытаний: - метод корректировки тепловой нагрузки, - метод теплового противодействия. В результате определяется корректировочная мощность  $\Delta Q$ , на величину которой изменяется энергоподвод к испарителю ТТ. Метод теплового противодействия сводится к тому, что при испытаниях ТТ осуществляется термостатирование среды в испытательной камере. В термобарокамере проведены испытания тепловой трубы, изготовленной из нержавеющей стали, заправленной аммиаком. Для исследования стабильности параметров ТТ использована автоматизированная измерительная система (АИС), работающая в комплекте с вычислительным комплексом ИВК-20. В АИС предусмотрена цифровая регистрация информации. Поскольку, подведенная мощность  $Q_i$  во всех случаях оставалась постоянной, то термические сопротивления, рассчитанные по отношению к  $Q_i$ , оказывались разными. При этом видно, что изменение  $t_c$  на  $6^\circ\text{C}$  изменит значение  $R_{tt}$  на 7% (рис.1). Условия вакуума (рис.1) изменяет  $R_{tt}$  на 15 %.

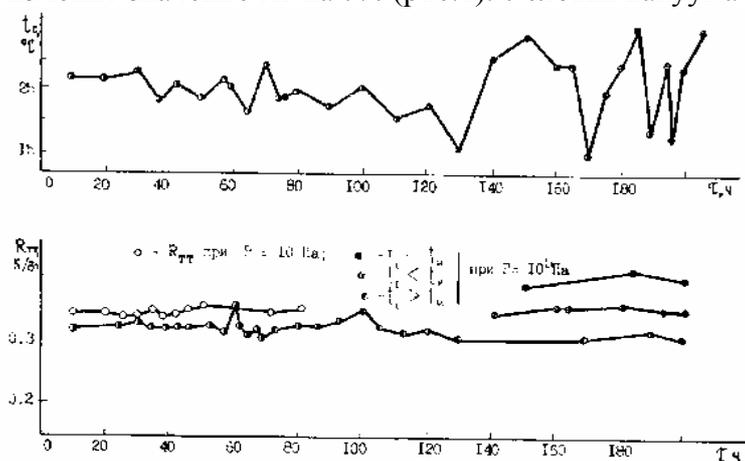


Рис.1. Влияние давления и температуры среды на величину термического сопротивления

## 3. Результаты ресурсных исследований тепловых труб.

Анализ ресурсных исследований ТТ позволяет сделать следующие выводы: 1. Основной причиной, определяющей изменение во времени термического сопротивления, являются коррозионные процессы, выделение неконденсирующегося газа, водорода. 2. Ресурсные характеристики ТТ определяются конструкцией ТТ (совместимостью материала корпуса и капиллярной структуры), технологией (сборка, промывка, дегазация, вакуумирование). 3. Технологические и конструктивные особенности ТТ исследователи учитывают эмпирическими константами. 4. Авторы ресурсных моделей пытаются описать кинетику изменения теплопередачи в ТТ одной зависимостью от момента изготовления ТТ до полного срока ее эксплуатации. 5. Положение о моделировании ресурсных характеристик ТТ после этапа ее "приработки" сделано в [НПО ПМ]. 6. Лучшие ресурсные характеристики имеют ТТ из совместимых пар "медь-вода". Таблица 1 иллюстрирует условия исследований авторов.

Параметры исследованных тепловых труб

№	материал ТТ	тип КС	теплоноситель	диаметр мм	Длина, мм	
					испарителя	конденсатора
	медь	спеченная	Вода	16	200	160
2	н/ж сталь	сетка	Вода	8	100	150
3	н/ж сталь	сетка	Нафталин	22,5	100	170
	углерод. сталь	канавки	Ацетон	27	200	1000
5	углерод. сталь	канавки	R113	27	200	1000
6	углерод. сталь	канавки	R318B2	27	200	1000
7	н/ж сталь	сетка	Ацетон	27	155	155

В каждом положении ТТ в установившемся режиме фиксировались температуры по поверхности ТС. Наименьшие значения  $R_t$  получены при верхних положениях термодар ( $\Theta = 0$ ). Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод, что ТТ лучше располагать в аппаратах под углом  $\beta > 15$ . Сравнение ТТ различных конструкций показывает, что наибольшие значения  $R_t$  у ТТ, работающей на нафталине, что не позволяет этой ТТ конкурировать с другими конструкциями. Целью ресурсных исследований было подтвердить заявленное выше положение о высокой стабильности ТТ с хладоновыми теплоносителями. Ресурсные исследования проводились на ТТ №5 (заправленной R-113), ТТ №6 (заправленной R-318B2), а на ТТ №4 (работающей на ацетоне). Номера ТТ соответствуют табл.1. Испытания проводились более года. На ТТ №4 есть увеличение холодной зоны у торца конденсатора.

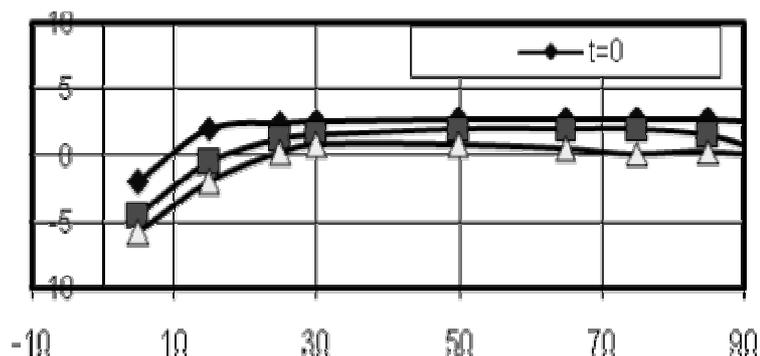


Рис.2. Изменение температур по длине конденсатора ацетоновой тепловой трубы

Это свидетельствует о выделении внутри ТТ №4 неконденсирующегося газа. На хладоновых ТТ №5 и №6 меньше неравномерности температур по поверхности, отсутствует холодная зона у торца конденсатора. Их достоинства видны из Рис.3

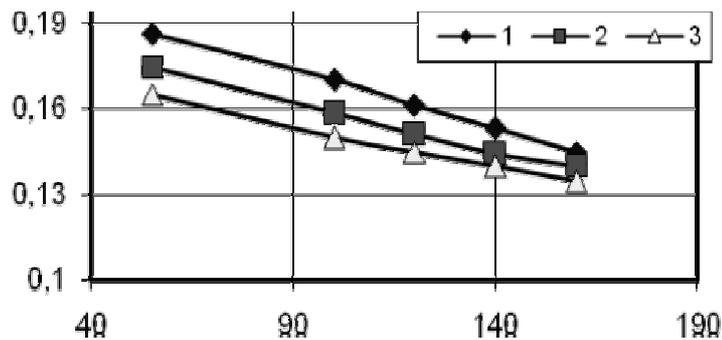


Рис.3. Влияние тепловой мощности на термическое сопротивление тепловой трубы  
1 – ТТ с ацетоном; 2 – ТТ с R318B2; 3 – ТТ с R113

Термическое сопротивление ТТ №4 на ацетоне, за год эксплуатации изменилось на 25%, а колебания температуры хладонных ТТ оставались в пределах 10% (рис.4).

**3. Обобщение ресурсных характеристик тепловых труб.** Для обобщения ресурсных характеристик ТТ, их анализа и разработки методики прогноза параметров ТТ в процессе длительной эксплуатации использовались данные настоящей работы и результаты полученные различными авторами. Первый период (период "а") - это приработка теплоносителя и поверхности ТТ. В зависимости от совместимости пар "теплоноситель-металл" здесь возможны процессы как роста, так и снижения термического сопротивления. Во втором периоде процесс старения ТТ носит регулярный характер. Процесс газовыделения, повышения  $R_t$  протекают в этом периоде практически линейно, но интенсивность этих процессов определяется конструкцией ТТ и технологией изготовителя.

$R_t$ , К/Вт

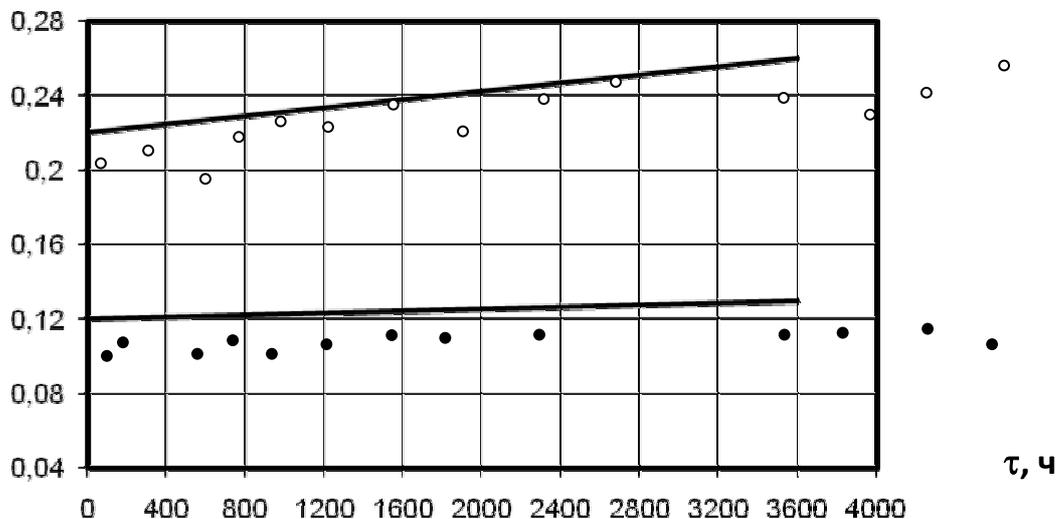


Рис.4. Ресурсные характеристики тепловых труб

Итоги выполненных исследований следующие: 1. Во всех количественных зависимостях ресурсных характеристик ТТ существует этап приработки и этап регулярного старения (роста  $R_t$ , количества газа). 2. Во всех исследованиях время первого этапа (приработки) изменяется от нескольких до 1000 часов. 3. Этап "с" (катастрофический отказ) можно прогнозировать по температурным регламентациям к рабочему телу ТТ. На этой основе и получено обобщение многих опытных данных по ресурсным характеристикам ТТ, график которого представлен ниже на Рис.5.

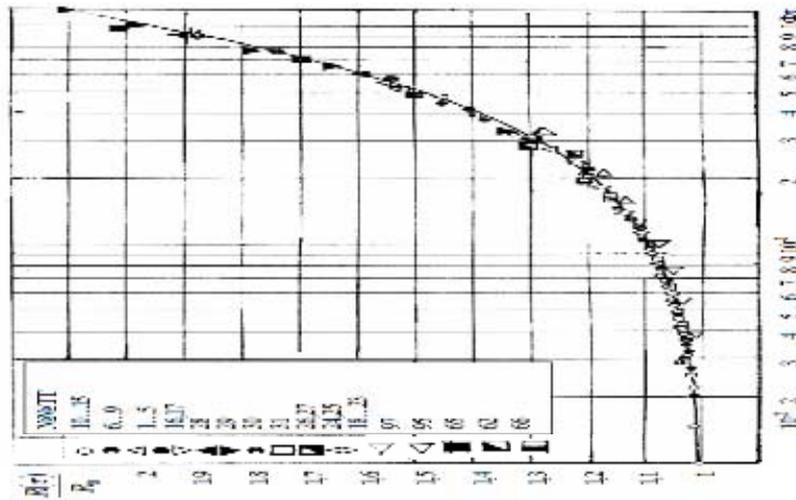


Рис.5. Обобщение ресурсных характеристик тепловых труб

### Литература

1. Schwartz I. "Performance map of the water heat pipe and the phenomenon of non - condensable gas generation"//ASME Paper, 1969. – N2HT – 15. pp.2 – 11.
2. Munzel W.D. "Compatibility tests of various heat pipe working fluids and structural materials at different temperatures."//3<sup>rd</sup> IHPC – Palo Alto, CA USA, 1978, - pp. 96 – 101.
3. Kreeb M, Groll M., and Zimmerman P., "Life Test Investigation with Low Temperature Heat Pipes", Proceeding of 1<sup>st</sup> IHPC, Stuttgart, Germany, October 1973, Paper N4 – 1.
4. Roesler S., Heine D. and Groll M. "Life Testing with Stainless Steel/ Ammonia and Aluminum/Ammonia Heat Pipe", Proceed. of 6<sup>th</sup> IHPC, Grenoble, France, 1987, Paper N211 – 216.
5. Honda T., Limisa T., Shimoda H. "A Study of Corrosion Phenomena in Water – steel Heat Pipes"// Proceeding of 5<sup>th</sup> IHPC, Tsukuba, Japan, - 1984, Paper N43 – 52.
6. Zhao Rong Di, Zhu Yu Hua, Liu De Chai. "Experimental investigation of the compatibility of mild carbon steel and water heat pipes"//Proc. of 6<sup>th</sup> IHPC, Gren., France, 1987, Paper N200 – 204.
7. Petric S.W. "Hydrogen Gas Generation in water – stainless steel heat pipes."// ASME. Paper WA/HT – 37. – 1972. N1. pp.1- 15.
8. Baker E. "Prediction of Long Term Heat Pipe Performance From Accelerated Life Testing", AIAA Journal (11/9), September 1979.
9. Бейкер Е. «Определение долговременных характеристик тепловой трубы по результатам ускоренных испытаний»//«Ракетная техника и космонавтика». – 1973год, N 9, стр. 157 – 159.
10. Белоусов В.П., Морачевский А.Г.«Теплота смешения жидкостей» Лен., 1978год. 256стр.
11. Гиль В.В., Минкович Е.Н., Шмырев А.Д. «К вопросу газовой выделению при длительной работе тепловых труб.»// ИФЖ, 1976год, N4. – стр. 594 – 600.
12. Шекриладзе И.Г., Авалишвили И.Г. «Исследование физико-химических процессов, определяющих надёжность тепловых труб». //Пром. теплот. – 1982г. – N2, вып.4.с.с.- 25 – 29.
13. Шекриладзе И.Г., Авалишвили И.Г.,«Переход твёрдых продуктов коррозии в теплоноситель газорегулируемых тепловых труб».Пром. теплот.1985г.N4, в.7. с.с.- 21 – 23.
14. Конев С.В., Мигуцкий Е.Г., Рахмани Разек. «Анализ работы неидеальной тепловой трубы»//Изв. вуз. Энерг. 1985. N6, с.99-101.
15. Ткачёв С.П., Смирнов Г.Ф., Гниличенко В.И. «Теплотехнические характеристики низкотемпературных тепловых труб при длительной эксплуатации и кинетика образования неконденсирующегося газа»//«Теплоэнергетика».1988,N3,с. 61-63.

16. Ткачѐв С.П., Смирнов Г.Ф., Гниличенко В.И., Коротков С.Г. Авт. Свид. СССР N 1385036 «Способ коррозионных испытаний полых образцов», Оpub. 30.03.88. Бюл. N12.
17. Ткачѐв С.П., Гниличенко В.И., Ткачѐва Т.С. «Определение ресурса тепловых труб»// «Вопросы радиоэлектроники». Сер. ОВР. 1988. – Выпуск 3 – сс. 11 – 16.
18. Ткачѐв С.П. «Теплотехнические характеристики низкотемпературных тепловых труб в условиях длительной эксплуатации». Авт. дис. на соиск. уч. ст. к.т.н.1989, ОИИТЭ, 17с. Од.
19. Murakami M., Arai K., Kojima Y., “Statiscal prediction of long term reliability of cooper – water heat pipes from acceleration test data”.Proc.6<sup>th</sup> IHPC Gren., France,1987.V.2,pp.194 – 199.
20. Murakami M. and Arai K., “Statiscal prediction of long term reliability of cooper – water heat pipes from acceleration test data”.//Proc. 6<sup>th</sup> IHPC (Grenoble, France)1987. pp. 2194 – 2199.
21. Zhao Rong Di, Zhu Yu Hua, Liu De Chai.“Experimental investigation of the compatibility of mild carbon steel and water heat pipes”. Proceed. of 5<sup>th</sup> IHPC, Tsukuba, Japan 1984, Paper N28 – 37.
22. ”Thermal qualification tests of longitudinal ammonia heat pipes for using in thermal control systems of small satellites”// Baturkin V. et al, 4<sup>th</sup> Minsk International Seminar “Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators”, - Belarus. – 2000. – pp. 261 – 269.
23. «Экспериментальное исследование тепловой трубы для космических аппаратов.», Батуркин и др.// «Промышленная теплотехника. – 2002. – том.24. N6. – сс.51 – 55.
24. Батуркин В.М., Олиференко Д.Н., Руденко А.И. «Определение количества неконденсирующегося газа в аммиачных алюминиевых тепловых трубах.» // «Промышленная теплотехника» - 2003. том.25. N5 – сс. 28 – 31.
25. Батуркин В.М. «Опыт применения Европейского Стандарта PSS – 49 при разработке тепловых труб для терморегулирования микро - спутника BIRD».», «Технология и конструирование электронной аппаратуры», N1, 2007, сс. 51 – 58.
26. Лукс А.Л., Матвеев А.Г. «Исследование высокоэффективных аммиачных тепловых труб для энергосберегающих систем терморегулирования крупногабаритных конструкций космического аппарата».»,«Вест. СамГУ. Естественнонаучная серия. Технические системы», 2007, N6 (56), сс. 401 – 418.
27. Лукс А.Л., Матвеев А.Г.«Анализ основных расчѐтных и экспериментальных теплофизических характеристик аммиачных тепловых труб повышенной тепловой проводимости из алюминиевых сплавов».», «Вест. СамГУ. Естественнонаучная серия. Технические системы», 2008, N3 (62), сс.331 –357.
28. Dr. Boris M. Rassamakin, Dr. Gomelya N. D., Khairnasov S. M., Rassamakina N.V. CHOICE OF THE EFFECTIVE INHIBITORS OF CORROSION AND THE RESULTS OF THE RESOURCES TESTS OF STEEL AND ALUMINIUM THERMOSYPHON WITH WATER. X International Heat Pipes Conference, September 1997, Stuttgart, Germany.