

УДК 536.27.001.5

**М. Г. Семена,  
Ю. Е. Николаенко****ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК  
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛОВОЙ  
ТРУБЫ С МЕТАЛЛОВОЛОКНИСТОЙ  
КАПИЛЛЯРНОЙ СТРУКТУРОЙ**

При разработке и создании тепловых труб (ТТ) для различных теплотехнических устройств, в частности для систем охлаждения радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) [1], необходимо учитывать, что в условиях эксплуатации современная РЭА может подвергаться значительным вибрационным нагрузкам, влияние которых на работу ТТ в настоящее время изучено еще недостаточно. В результате одних экспериментальных исследований [2] каких-либо изменений характеристик ТТ при воздействии радиальной вибрации выявлено не было, в то время как авторами другой работы [3] было установлено, что продольные вибрационные нагрузки могут уменьшить максимальный передаваемый тепловой поток при наклонном положении (испаритель вверх) ТТ. Причем уменьшение теплопередающей способности на низких частотах (60 и 120 Гц) проявлялось более резко, чем на высоких (240 и 580 Гц). Общим недостатком исследований [2, 3] является использование тепловых труб с далеко несовершенной капиллярной структурой (спрессованные спирально-навитые проволоочные нити и пористый металлический лист, не спеченные с корпусом ТТ) и узкий диапазон изменения параметров вибрационных нагрузок.

В более широком диапазоне изменения параметров вибрационных нагрузок были выполнены исследования [4], проведенные на пяти сериях ТТ диаметром 10 и 12 мм, длиной от 250 до 480 мм с сеточными, металловолоконными и спеченными из шариков капиллярными структурами. Результаты исследований не выявили каких-либо изменений в характеристике температурного поля ТТ при воздействии на них продольных и радиальных вибрационных нагрузок. Однако исследован был только испарительный режим работы ТТ, в то время как для ТТ с такими капиллярными структурами, как металловолоконная, для практики наиболее интересен режим кипения. Ограниченное количество экспериментальных исследований и отмеченные их недостатки требуют более широкого и детального изучения влияния вибрационных нагрузок на основные характеристики ТТ.

Для исследования характеристик ТТ в условиях воздействия вибрационных нагрузок была выбрана Т-образная ТТ с металловолоконной капиллярной структурой, предназначенная для использования в системе охлаждения съемного радиоэлектронного блока [5]. Экспериментальная ТТ имела общий паровой канал. Корпус ТТ изготовлен из двух отрезков медных труб прямоугольного сечения. Вертикальная часть ТТ служила зоной теплоподвода, горизонтальная — объединяла зоны конденсации (верхняя ее стенка) и транспорта (нижняя стенка). Размеры вертикальной части 12×25×125 мм, горизонтальной — 12×52×125 мм. Все соединения выполнены сваркой. Материал волокон — медь, длина исходных волокон 3 мм, диаметр 50 мкм. Толщина капиллярной структуры в зоне теплоподвода 0,5 мм, в зоне транспорта 0,7 мм. Крепление ее к корпусу, а также соединение волокон между собой выполне-

но спеканием. Пористость 85 %, средний диаметр пор 110 мкм. Зона конденсации капиллярной структурой не покрывалась. Теплоноситель — дистиллированная вода.

Экспериментальный участок (рис. 1) включал ТТ, корпус съемного радиоэлектронного блока, в котором была установлена ТТ, и вспомогательную металлическую раму с устройством крепления [6]. Нижнее основание вспомогательной рамы опорное, верхнее — выполнено в виде холодной плиты, содержащей внутренние каналы для прокачки охлаждающей жидкости. Такая конструкция экспериментального участка

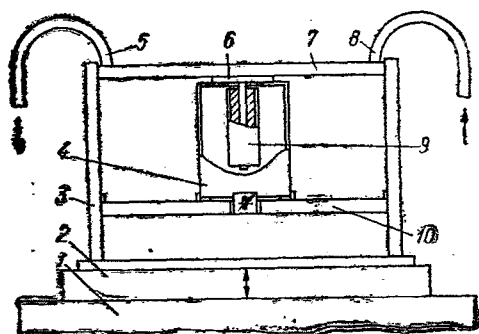
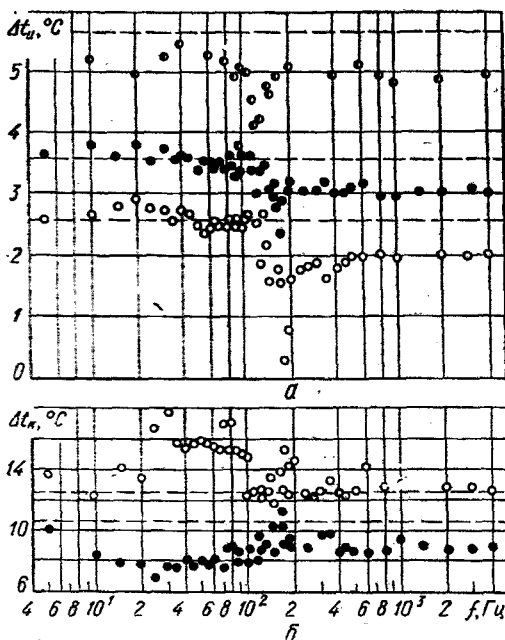


Рис. 1. Схема экспериментального участка: 1 — основание, 2 — стол вибростенда; 3 — рама; 4 — корпус съемного радиоэлектронного блока; 5 — шланг для отвода охлаждающей воды; 6 — Т-образная тепловая труба; 7 — охлаждаемое основание; 8 — шланг для подвода охлаждающей жидкости; 9 — нагреватель; 10 — опорное основание.

Рис. 2. Зависимость перепада температур от частоты вибрации в зоне теплоподвода (а) и в зоне конденсации (б). Точки  $\circ$  —  $\varphi=45^\circ$ ,  $a=g$ ,  $q=5$  Вт/см<sup>2</sup>;  $\bullet$  —  $90^\circ$ ,  $g$ , 5 Вт/см<sup>2</sup>;  $\circ$  —  $90^\circ$ , 2 г, 10 Вт/см<sup>2</sup>.



обеспечивала надежный термический контакт зоны конденсации ТТ с холодной плитой и высокую жесткость конструкции при механических воздействиях. Вертикальная часть ТТ (площадь поверхности 70 см<sup>2</sup>) снабжена алюминиевым блоком с нихромовым нагревателем. Вся система тщательно теплоизолировалась слоем базальтового войлока, что исключало притоки и оттоки теплоты. Двадцать тарированных медь-константановых термопар (диаметр проводов 0,16 мм) были распределены следующим образом: по пять термопар в зонах теплоподвода, транспорта и конденсации, одна в паровом канале и четыре в контактной поверхности холодной плиты. Температура воды на входе и выходе холодной плиты измерялась ртутными термометрами с ценой деления 0,1 °C. Термоздс термопар измерялась цифровым ампервольтметром типа Ш 68000, подключенным к термопарам через переключатель. Контроль подводимой электрической мощности осуществлялся измерительным комплектом типа К-50. Напряжение сети стабилизировалось стабилизаторами типа С-0,9.

Экспериментальный участок закреплялся на столе электродинамического вибростенда типа ВЭДС-1500, позволяющего получать при встряхивании стола вынуждающую силу 15000 Н. Технические характеристики вибростенда предварительно подвергались проверке и соответ-

ствовали их паспортным значениям [7]. Экспериментальные исследования были проведены в диапазоне изменения частоты вибрации от 5 до 4000 Гц и виброускорения от 0,2 до 15  $g$  ( $g$  — ускорение земного тяготения). Датчиком ускорения служил пьезоэлектрический виброизмерительный преобразователь типа Д-14.

| Номер серии | Величина, принятая |             |               | Угол наклона $\varphi$ |
|-------------|--------------------|-------------|---------------|------------------------|
|             | постоянной         | параметром  | изменяемой    |                        |
| 1           | $Q=350$ Вт         | $a=1$ $g$   | $f=0-4000$ Гц | 90°                    |
| 2           | То же              | $a=2$ $g$   | $f=0-4000$ Гц |                        |
| 3           | То же              | $f=5$ Гц    | $a=0-5$ $g$   |                        |
| 4           | То же              | $f=60$ Гц   | $a=0-15$ $g$  |                        |
| 5           | То же              | $f=200$ Гц  | $a=0-15$ $g$  |                        |
| 6           | $a=2g$             | $f=5$ Гц    | $Q=0-350$ Вт  |                        |
| 7           | То же              | $f=60$ Гц   | $Q=0-350$ Вт  |                        |
| 8           | То же              | $f=200$ Гц  | $Q=0-350$ Вт  |                        |
| 9           | То же              | $Q=350$ Вт  | $f=0-4000$ Гц |                        |
| 10          | То же              | $Q=700$ Вт  | $f=0-4000$ Гц |                        |
| 11          | $f=60$ Гц          | $a=0,5$ $g$ | $Q=0-350$ Вт  |                        |
| 12          | То же              | $a=2$ $g$   | $Q=0-350$ Вт  |                        |
| 13          | $Q=350$ Вт         | $a=1$ $g$   | $f=0-4000$ Гц | 45°                    |
| 14          | То же              | $f=60$ Гц   | $a=0-15$ $g$  |                        |
| 15          | $a=1g$             | $f=5$ Гц    | $Q=0-630$ Вт  |                        |
| 16          | То же              | $f=60$ Гц   | $Q=0-630$ Вт  |                        |
| 17          | То же              | $f=200$ Гц  | $Q=0-630$ Вт  |                        |
| 18          | То же              | $f=4000$ Гц | $Q=0-630$ Вт  |                        |
| 19          | $f=60$ Гц          | $a=1$ $g$   | $Q=0-630$ Вт  |                        |
| 20          | То же              | $a=2$ $g$   | $Q=0-630$ Вт  |                        |

Методика эксперимента заключалась в следующем. Из трех переменных величин (тепловой поток  $Q$ , частота вибрации  $f$  и виброускорение  $a$ ) одна фиксировалась, другая принималась в качестве изменяемого параметра, а третья ступенчато варьировалась в широких пределах (см. таблицу). Последовательность выполнения опытов в пределах каждой серии экспериментов была следующей. В каналы холодной плиты подавалась вода с температурой  $17,5 \pm 0,5$  °C, расход которой в дальнейшем поддерживался постоянным ( $2 \pm 0,01$  кг/мин). На нагреватель ступенчато подавалась электрическая мощность и определялась статическая зависимость температурного поля системы от подводимого теплового потока (тепловой поток определялся по электрической мощности). Затем электрическая мощность снималась. Система приходила в исходное состояние. Устанавливалась заданная величина теплового потока (в случае выбора в качестве постоянной величины  $Q$ ) и включался вибростенд. В качестве параметра выбиралась другая переменная величина, например, виброускорение  $a$ , и ступенчато изменялась частота вибрации стола вибростенда. Чтобы не пропустить возможных резонансных явлений в системе частота изменялась с малым шагом (5 Гц) [8]. Для каждого нового значения частоты вибрации перед замером температур выдерживалось определенное время, по истечении которого показания цифрового ампервольтметра не изменялись. После окончания одной серии экспериментов вибрационная нагрузка полностью снима-

лась и устанавливалось новое значение выбранного параметра, после чего процесс ступенчатого изменения частоты повторялся. После каждой серии экспериментов снималось поле температур в статическом режиме. Аналогично выполнялись опыты, в которых другие величины были постоянными.

На рис. 2 показана характерная зависимость перепада температур в зонах теплоподвода и конденсации ТТ от частоты вибрации. Штриховыми линиями показаны уровни температур в статическом режиме работы ТТ. Видно, что в основном режиме работы (режим кипения) при умеренных значениях плотностей тепловых потоков ( $5 \text{ Вт/см}^2$ ) вибрационные нагрузки в диапазоне частот от 5 до 80 Гц мало влияют на процессы теплообмена в зоне теплоподвода. Заметное снижение температурного перепада, до 14 % при вертикальном расположении ТТ и до 20 % при угле

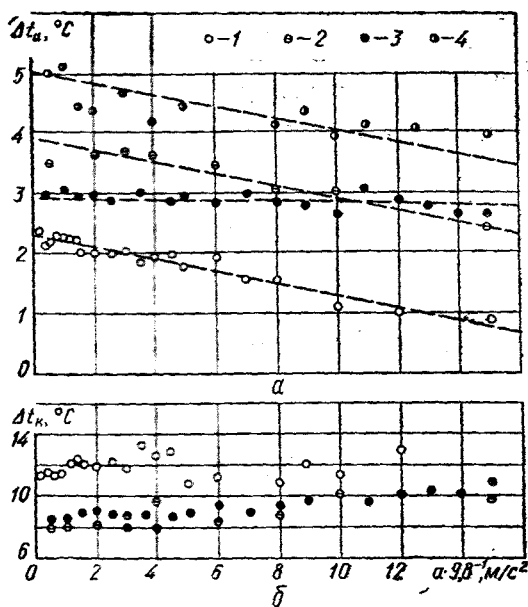


Рис. 3. Зависимость перепада температур от виброускорения в зоне теплоподвода (а) и конденсации (б). Точки 1— $\varphi=45^\circ$ ,  $q=5 \text{ Вт/см}^2$ ,  $f=60 \text{ Гц}$ ; 2— $90^\circ$ ,  $5 \text{ Вт/см}^2$ ,  $60 \text{ Гц}$ ; 3— $90^\circ$ ,  $5 \text{ Вт/см}^2$ ,  $200 \text{ Гц}$ ; 4— $90^\circ$ ,  $10 \text{ Вт/см}^2$ ,  $20 \text{ Гц}$ .

наклона  $45^\circ$ , наблюдается в области частот от 80 до 4000 Гц. Причем в диапазоне частот приблизительно от 80 до 200 Гц зависимость температурного перепада от частоты имеет вид ломаной линии с явно выраженными участками резкого снижения перепада температур в зоне теплоподвода, соответствующими отдельным значениям частоты и имеющими характер резонансных кривых. Так, при угле наклона ТТ  $45^\circ$  на частоте вибрации 185 Гц наблюдается снижение перепада температур с 2,55 (статический режим) до  $0,25^\circ\text{C}$ . В области частот от 200 до 4000 Гц экспериментальные точки группируются около некоторой плавной линии, приближающейся к прямой. При более высокой плотности теплового потока ( $10 \text{ Вт/см}^2$ ) вибрационные нагрузки приводят к некоторому снижению перепада температур в зоне теплоподвода также и на начальном интервале частот (5—80 Гц).

Результаты экспериментальных исследований (см. рис. 2) показали, что влияние частоты вибрационных нагрузок на перепад температур в зоне конденсации Т-образной ТТ проявляется по-разному, в зависимости от ориентации ее в поле сил гравитации. При вертикальном расположении ТТ (зона конденсации горизонтальна), начиная с нижней граничной частоты вибрации 5 Гц, вибрационные нагрузки приводят к некоторому (от 10 до 38 %) снижению перепада температур по сравнению со статическим режимом. При наклонном положении (зона конденсации также наклонена) в диапазоне частот от 15 до 100 Гц перепад температур увеличивается на 20—40 %, а свыше 100 Гц — приближается к значению перепада, соответствующему статическому режиму.

Влияние виброускорения на перепад температур в зонах теплоподвода и конденсации ТТ показано на рис. 3. По мере увеличения виброускорения перепад температур в зоне теплоподвода линейно уменьшается. Влияние виброускорения на перепад температур в зоне конденсации незначительно.

В результате выполнения экспериментальных серий, в которых ступенчато изменялся подводимый тепловой поток, было установлено, что переход от испарительного режима работы ТТ к режиму кипения при всех параметрах вибрационных нагрузок (в пределах изменения, указанных в таблице), независимо от их абсолютной величины, наступал раньше, чем при отсутствии вибрации. Если в статическом режиме переход наступал при плотности теплового потока  $0,9 \text{ Вт/см}^2$ , то при воздействии вибрационных нагрузок — при  $0,8 \text{ Вт/см}^2$  ( $0,1 \text{ Вт/см}^2$  соответствует тепловому потоку на нагревателе  $70 \text{ Вт}$ ). О наличии переходного режима судили по резкому падению температуры стенки и перепада температур в зоне теплоподвода.

В испарительном режиме работы ТТ влияние вибрационных нагрузок на процесс теплообмена в зоне теплоподвода не обнаружено, что согласуется с экспериментальными данными работы [4].

Влияние вибрационных нагрузок на работу транспортной зоны изучалось в сериях экспериментов 15—20. Было установлено, что для данной конструкции ТТ вибрационные нагрузки приводят к снижению максимального передаваемого теплового потока. О том, что тепловой поток достиг максимального значения, судили по резкому росту температуры стенки ТТ в зоне теплоподвода хотя бы в одной точке. Если в статическом режиме работы максимальный тепловой поток, передаваемый ТТ при угле наклона  $45^\circ$ , составлял  $630 \text{ Вт}$ , то во всех сериях экспериментов при воздействии вибрационных нагрузок он снижался на одну и ту же величину и составлял  $490 \text{ Вт}$ .

Причиной изменения основных характеристик ТТ при воздействии вибрационных нагрузок является наличие резонансных эффектов, обусловленных совпадением частоты вибрации с частотой отрыва пузырей в пароотводящих порах и частотой собственных колебаний теплоносителя в питающих порах капиллярной структуры в зоне теплоподвода, с частотой собственных колебаний теплоносителя в порах капиллярной структуры в зоне транспорта и с собственной частотой капель теплоносителя в зоне конденсации.

Таким образом, результаты экспериментального исследования характеристик Т-образной ТТ с металловолоконистой капиллярной структурой в статическом и динамическом режимах показали, что вибрационные нагрузки в пределах частоты вибрации от  $5$  до  $4000 \text{ Гц}$  и виброускорения от  $0,2$  до  $15 \text{ g}$  оказывают определенное влияние на процессы теплообмена и гидродинамики в зонах ТТ, а, следовательно, и на ее основные характеристики (термическое сопротивление и максимальный передаваемый тепловой поток).

## SUMMARY

Experimental data show that vibratory loads in  $5\text{--}4000 \text{ Hz}$  range and  $0.2\text{--}15 \text{ g}$  acceleration can cause variations in the heat pipe metal-fibrelike capillary structure. The above-mentioned variations are explained by resonance effects.

2. Гниличенко В. И., Креминская И. В. Исследование влияния условий эксплуатации на характеристики низкотемпературных тепловых труб.—Вопр. радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1975, вып. 2, с. 56—63.
3. Richardson J. W., Whitehurst Ch. A., Whitehouse G. D. The Effect of Longitudinal Vibration on Heat Pipe Performance.—J. Astronaut. Sci., 1970, 17, N 5, p. 249—266.
4. Барабаш М. Б., Новицкая Т. И., Янковский В. Н. Влияние внешних воздействий на характеристики тепловых труб.—Вопр. радиоэлектроники. Сер. ТРТО, 1979, вып. 3, с. 71—83.
5. А. с. 736391 (СССР). Съемный радиоэлектронный блок / М. Г. Семена, Ю. Е. Николаенко.—Опубл. в Б. И., 1980, № 19.
6. А. с. 738205 (СССР). Устройство для крепления радиоэлектронного блока / Ю. Е. Николаенко, А. Т. Туник, В. И. Черный, А. П. Яковенко.—Опубл. в Б. И., 1980, № 20.
7. Князевич В. И. Электродинамическая вибрационная установка с высокими техническими параметрами.—Электрон. техника. Сер. 8. Управление качеством, метрология, стандартизация, 1979, вып. 5, с. 19—24.
8. Фролов В. И. Механические воздействия и защита электронной аппаратуры.—Киев: Вища школа, 1979.—128 с.

Получено 25. 07. 80 г.

После переработки 16. 03. 81 г.

УДК 536.2.01

А. А. Халатов,  
А. Л. Сатановский

## НЕСТАЦИОНАРНОЕ ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПЛОСКОЙ ПЛАСТИНЫ С МЕСТНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОТЫ НА ЕЕ ПОВЕРХНОСТИ

Исследование и расчет испарения одиночных капель жидкости, конденсации пара, технологических процессов резания, сварки металлов и многих других сводятся к определению нестационарного температурного поля в плоской пластине при наличии местного источника (стока) теплоты на ее поверхности.

Рассмотрим задачу нестационарной теплопроводности в плоской пластине толщиной  $\delta$ , имеющей постоянную начальную температуру  $t_0$ . На одной из поверхностей пластины действует местный сток теплоты постоянного радиуса и переменной производительности  $q_*(\tau)$ . Поскольку при этом возникает радиально-симметричная область возмущения, то решение удобно выполнить в цилиндрической системе координат.

Математическое описание рассмотренной задачи имеет вид

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau}; \quad (1)$$

$$z=0, \quad 0 < r < r_s, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = -q_*(\tau)/\lambda; \quad (2)$$

$$r_s < r, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad z=\delta, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0; \quad (3)$$

$$r=R, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \quad \tau=0, \quad T=0, \quad (4)$$

где  $T=t-t_0$ ;  $t(r, z, \tau)$  — температура пластины в произвольной точке;  $r, z$  — цилиндрические координаты;  $\tau$  — время;  $\delta$  — толщина пластины;  $a, \lambda$  — коэффициенты температуро- и теплопроводности пластины.