

## РЕЛАКСАЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ТЕПЛОВЫХ ТРУБАХ

Г.А. Кривonosов, И.Н. Онищенко

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,  
Харьков, Украина

E-mail: krivonosov40@gmail.com

В отличие от существующих моделей функционирования тепловых труб (ТТ), использующих приближение ламинарного потока пара от испарителя к конденсатору, рассмотрена модель релаксационного режима работы в ТТ. Проведены эксперименты, в которых такой режим наблюдается. Представлена математическая модель этого режима и приведено описание функционирования ТТ в таком режиме. Определены возможные достоинства релаксационного режима, реализована модифицированная тепловая труба, использующая релаксационный режим, и показана ее большая эффективность.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В существующей в настоящее время литературе физические принципы работы тепловых труб (ТТ) трактуются в рамках математической модели с ламинарным стационарным потоком пара от испарителя к конденсату в тепловой трубе [1,2,3]. Однако судя по звуковому потрескиванию (в значительной мере хаотическому), сопровождающему работу ТТ, физические процессы при работе ТТ являются не стационарными. В настоящем сообщении приводится экспериментальное доказательство нестационарного режима работы ТТ. Изложена физическая модель возможного релаксационного режима и приведены оценки параметров такого режима. Приведена конструкция модифицированной ТТ, в которой введены два дополнительных узла, которые увеличивают эффективность теплопереноса в ТТ, работающей в релаксационном режиме. Один из этих узлов представляет собой пристыкованный к ТТ дополнительный объем, предназначенный для сглаживания релаксационных колебаний, другой узел является конденсатором улучшенной геометрии, обеспечивающий более эффективную конденсацию пара.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ТТ

На термосифон повышенной эффективности [4] в месте между конденсатором 1 (Рис.1) и испарителем 4 закреплен микрофон 5. Его выход соединен с входом операционного усилителя, выход операционного усилителя соединен с входом осциллографа, который работает в ждущем режиме (операционный усилитель и осциллограф не показаны на Рис.1). Термосифон имеет следующие линейные параметры: внутренний паропровод имеет длину 15 см с внутренним диаметром 1 см; длина термосифона – 40 см с внешним диаметром 1,8 см. Все детали термосифона выполнены из меди, часть конденсатора 1 выполнена из дюрала. Осциллограмма рабочего режима термосифона показана на Рис.2. Длительность импульса 2...2.5 мс, с фронтами 1...1.5 мс. Максимум на осциллограмме можно трактовать как звуковые колебания, сопровождающие процессы кипения и перемещение паров воды внутреннего паропровода.

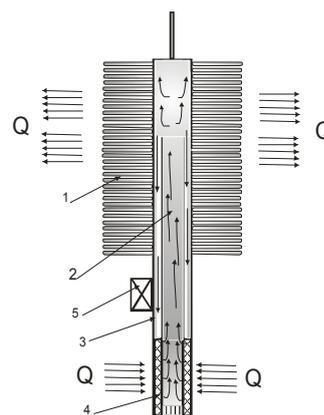


Рис.1. Термосифон повышенной эффективности:

- 1 – конденсор; 2 – поток пара;  
3 – сток сконденсированной воды;  
4 – место кипения воды; 5 – микрофон

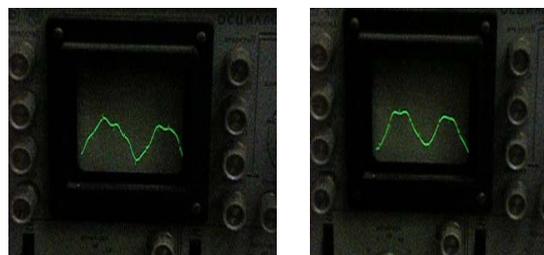


Рис.2. Осциллограммы звуковых сигналов при работе ТТ

### 3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕЛАКСАЦИОННОГО РЕЖИМА ТТ

Суть модели заключается в следующем. Обозначим  $T_1$  температуру внешнего источника тепла,  $T$  – температуру внутри ТТ, а  $T_2$  – температуру конденсатора (теплоотводящего устройства, см. Рис.1). Полагаем, что  $T < T_1$ , а давление внутри ТТ  $p_0$  – меньше атмосферного. По мере передачи тепла от внешнего источника через стенки ТТ температура  $T(t)$  во внутренней нижней её части повышается. При температуре  $T(t)$  выше точки кипения или равной  $T_k(p)$  ( $T_k(p) \leq T_1$ ) начинается процесс кипения, при этом давление  $p$  внутри ТТ повышается. Кипение жидкости происходит до тех пор, пока давление внутри ТТ не достигнет такой величины, при которой  $T(t)$  станет меньше  $T_k(p)$ , что приводит к прекращению кипения. Так как объем внутри ТТ замкнутый, то давление по закону Паскаля равномерно распре-

ляется по всему объёму. При некотором давлении пар с его повышением становится насыщенным для температуры  $T_2$ , он конденсируется на стенках конденсора, и как следствие, давление в верхней части ТТ понижается, что образует градиент вдоль внутреннего паропровода и приводит к массопереносу пара. Из-за выключенного кипения воды поступление пара в объём ТТ прекращается. Процесс конденсации длится до тех пор, пока давление пара не понизится до уровня насыщения  $T_k(p)$ , при котором конденсация не происходит. В процессе конденсации пара в отсутствие кипения воды в теплоприёмнике давление пара внутри ТТ понижается до величины, при которой возобновляется процесс кипения. Далее описанный процесс периодически повторяется. Таким образом, «самоотключение» кипения испарителя и его «самовключение» возникают при колебаниях давления (рост давления происходит при кипении и испарении, при недостаточном теплопереносе пара от испарителя к конденсатору внутри ТТ, а его слабое падением - в результате компенсации конденсацией с отключенным испарением).

Рассмотрим более детально два режима – стационарный и релаксационный.

### 3.1. СТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ

Режим  $\Delta Q/\Delta t = const$  - при котором тепло  $Q$  с температурой  $T_1$ , поступающее в испаритель через стенки трубки потоком пара, вызванным градиентом давления, передаётся через конденсацию на конденсаторе с температурой  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) в приёмник тепла (например, окружающая среда). В единицу времени через стенки приёмника (испарителя) поступает мощность

$$W = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = R(T_1 - T_k(p)), \quad (1)$$

где  $T_k(p)$  – температура кипения испарителя при давлении  $p(T_1)$  в ТТ,  $R$  – тепловое сопротивление стенки испарителя. Эта мощность нагревает воду и превращает её в пар, количество  $\Delta m$  которого в единицу времени определится как

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{W}{\lambda(T_k)}, \quad (2)$$

где  $\lambda(T_k)$  – скрытая теплота испарения жидкости в испарителе.

Скорость приращения числа молекул  $\Delta N$  при испарении

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \frac{WN_a}{\lambda(T_k)\mu}, \quad (3)$$

где  $N_a$  – число Авогадро;  $\mu$  – молекулярный вес жидкости. Образовавшийся пар при разности давления у испарителя и конденсатора,

$$\Delta p = p(T_1) - p(T_2),$$

создаёт поток

$$\rho u = v \text{grad} p(T), \quad (4)$$

где  $v = 1/\eta$  – вязкость;  $\eta$  – тягучесть;  $\rho = mn$  – плотность пара;  $n$  – число молекул в  $1 \text{ см}^3$ .

Скорость потока  $u$  найдём исходя из того, что

$$\frac{\Delta N}{n} = S \Delta L,$$

где  $S$  – поперечное сечение внутри ТТ;  $\Delta L$  – длина трубки, занятая испарившимися молекулами  $\Delta n$ ;  $L$  – вся длина ТТ. Тогда

$$u = \frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{\Delta N}{\Delta t} \frac{1}{Sn},$$

используя (3), получаем

$$u = \frac{WN_a}{\lambda(T_k)\mu Sn} \frac{1}{Sn}. \quad (5)$$

Выражение (4) с учётом (5) принимает вид:

$$\rho \frac{WN_a}{\lambda(T_k)\mu Sn} = \frac{v(p(T_1) - p(T_2))}{L}. \quad (6)$$

Зависимость  $p(T)$  может быть взята из известной экспериментальной кривой или же приближенно представлена как

$$p(T_1) = p(T_2) + dP/dT (T_1 - T_2), \quad (7)$$

и соотношение (6) примет вид:

$$\rho \frac{WN_a}{\lambda(T_k)\mu Sn} = \frac{v(T_1 - T_2)}{L} \frac{dP}{dT}.$$

Воспользовавшись уравнением Клапейрона-Клаузиуса,

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\lambda(T_k)}{(V_{y0}^{nap} - V_{y0}^{жид})T} \approx \frac{\lambda(T_k)}{V_{y0}^{nap}T} \approx \lambda(T_k) \frac{n}{T}, \quad (8)$$

имеем

$$\frac{\rho WN_a}{\lambda(T_2)\mu Sn} = \frac{v\lambda(T_2)n(T_2)}{LT_2} (T_1 - T_2). \quad (9)$$

При заданных  $T_2$  для параметров ТТ ( $L, S, \rho, v$ ) имеем, что в испарителе установится температура

$$T_1'' = T_2 + \frac{\rho WN_a LT_2}{v\mu S \lambda^2(T_2) n^2(T_2)}. \quad (10)$$

Стационарный режим может быть только при  $T_1 = T_{кин}(p_1)$ . При этом переносимое тепло в единицу времени

$$W = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\mu S \lambda^2(T_2) n^2(T_2)}{v\rho N_a LT_2} \Delta T = \chi \Delta T, \quad (11)$$

где  $\chi = \frac{\mu S \lambda^2(T_2) n^2(T_2)}{v\rho N_a LT_2}$  – коэффициент теплопередачи ТТ, определенный потоком пара. В противном случае режим работы ТТ будет не стационарным, в частности, релаксационным.

### 3.2. РЕЛАКСАЦИОННЫЙ РЕЖИМ

Если скорость испарения настолько велика, что поток пара вдоль ТТ не успевает переносить выделяемое при испарении тепло

$$\frac{\rho WN_a}{\lambda(T_k)\mu Sn} \triangleright \frac{v\lambda(T_k)n}{LT_2} (T_1 - T_2), \quad (12),$$

то вблизи испарителя быстро поднимается давление  $p_1$  до величины  $p_2$ , при котором  $T_1$  становится меньше температуры кипения  $T_{кин}(p_2)$  и кипение прекращается, т.е. выделение (передача) тепла прекращается и, следовательно, его перенос к конденсатору уменьшается. Время  $\tau_1$ , в течение которого давление вырастет (увеличится) до  $p_2$  (выключение

кипения), в приближении слабого теплопереноса через ТТ определим из

$$p_2 = p_1 + KT_1 \Delta t \, dn/dt,$$

$$\tau_1 = \Delta t = \frac{(p_2 - p_1)SL}{kT_1 \Delta N / \Delta t}. \quad (13)$$

В дальнейшем процесс сводится к теплопереносу выделенного тепла  $Q(TI) = W(TI) \tau_1$  через ТТ к конденсору. На это требуется время

$$\tau_{TT} = \frac{W(T_1) \tau_1}{\lambda(T_1) \rho(T_1) u(T_1) S}. \quad (14)$$

Подставляя в (14) выражение (13) для  $\tau_1$  и (5) для  $u$ , получаем

$$\tau_{TT} = \frac{(p_2 - p_1) \mu n(T_1) SL}{kT_1 N_a \rho(T_1) \Delta N / \Delta t}. \quad (15)$$

За время  $\tau_{TT}$  давление у испарителя  $p_1$  и конденсора  $p_2$  выравнивается, что приводит к остановке теплопереноса.

Происходящая у конденсора конденсация пара понижает давление вблизи, а затем и у испарителя. При уменьшении давления до величины  $p(T_{кун})$  включается кипение жидкости в испарителе, и процесс повторяется. Время конденсации  $\tau_2$ , приводящей к «самовключению» кипения, определим из

$$\frac{dO(T_2)}{d\tau} = \lambda(T_2) \rho(T_2) u(T_2) S,$$

$$\tau_2 = \frac{W(T_2) \tau_1}{\lambda(T_2) \rho(T_2) u(T_2) S}. \quad (16)$$

Таким образом, релаксационный режим представляет собой следующий процесс. Кипение жидкости начинается при нагревании испарителя от охлаждаемого объекта в испарителе до температуры кипения жидкости  $T_k(p)$ , определяемой начальным давлением в ТТ. Испарение жидкости приводит к повышению давления у испарителя и началу теплопередачи паром вдоль ТТ. Рост давления способствует возрастанию точки кипения  $T_k(p)$  и температуры жидкости  $T_{ж}(t)$  вплоть до температуры охлаждаемого объекта  $T_1$  и, как следствие, прекращению передачи тепла жидкости от объекта. При этом увеличение давления поднимает температуру кипения  $T_k(p)$  выше  $T_{ж}(t)$ , так что кипение (парообразование) прекращается через время  $\tau_1$ . Процесс теплопереноса вдоль ТТ выравнивает температуру в объёме ТТ за время  $\tau_{TT}$ , и теплопередача прекращается. Повысившееся давление пара у конденсора, где  $T_2 < T_1$ , способствует переходу его в насыщенное состояние и к началу конденсации (понижению давления в месте конденсора). Следующее за этим понижение давления (по закону Паскаля) и его выравнивание в объёме ТТ даёт старт кипению жидкости. Этот процесс периодически повторяется.

#### 4. МОДИФИЦИРОВАННАЯ ТТ, РАБОТАЮЩАЯ В РЕЛАКСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ

Уменьшить время релаксационных колебаний, как следует из (15), возможно изменением  $(p_2 - p_1)$  и  $W$ . Это означает, во-первых, что величина  $(p_2 - p_1)$

должна быть близкой к нулю, т.е. испаритель и конденсор располагаются рядом и соединяются широким каналом, во-вторых, передаваемая мощность должна быть относительно большой. Для выполнения этих условий необходимо уменьшить разность между значениями  $p_2$  и  $p_1$ . Для этого в ТТ в пространство испарителя был вставлен узел 5 (Рис.3), обеспечивающий более эффективную конденсацию пара, уменьшающий эффективный объём конденсора и приближающий входящий пар в эту область к стенкам конденсатора. Такая конструкция конденсора обеспечивает сдувание горячим паром со стенок сконденсированную жидкость. Другой узел представляет собой пристыкованный к ТТ дополнительный объём 6 (см. Рис.3), предназначенный для сглаживания релаксационных колебаний, демпфируя при этом горячий пар вблизи холодных стенок конденсора.

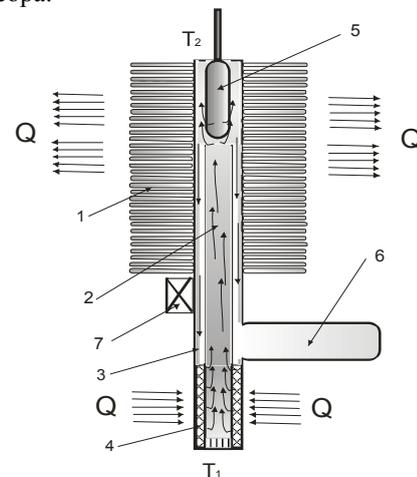


Рис.3. Термосифон повышенной эффективности: 1 – конденсатор; 2 – поток пара; 3 – сток сконденсированной воды; 4 – место кипения воды; 5 – дополнительный узел; 6 – дополнительный объём; 7 – микрофон

Оптимизация габаритных параметров дополнительных устройств 5 и 6 (см. Рис.3) представляет собой трудоёмкую работу, так как для каждой модели ТТ следует подбирать характеристические параметры. Из общих соображений рекомендуем дополнительный объём 6 делать не менее величины внутреннего объёма ТТ.

Тепловые характеристики ТТ до усовершенствования её и после приведены в Таблице.

Параметры ТТ	Температура начала работы ТТ, °С	Тепловое сопротивление, град/Вт
До реконструкции	41...45	0,026
После реконструкции	25	0,021

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально обнаруженные звуки при работе термосифона повышенной эффективности тракуются как релаксационные колебания, возникшие при передаче тепла.

Приводятся теоретические оценки такого эффекта, из которых следует (при сравнении (14) и (16)), что

релаксационные процессы возникают в тех случаях, когда разность давления ( $p_2 - p_1$ ) велика, или когда поперечное сечение трубы сравнительно мало с его длиной, а также, когда тепловые характеристики рабочей жидкости (в частности, теплоемкость) зависят от температуры.

Для погашения релаксационных колебаний при работе тепловой трубы в её конструкцию вводятся два элемента. Тепловое сопротивление при этом улучшается на 20%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н.И. Белаш, В.Б. Елисеев, А.В. Романкевич. *Тепловые трубы*. Харьков, 1981, ч.1, с. 12-27.
2. С.А. Ковалёв, *Испарение и конденсация в тепловых трубах*. М.: «Наука», 1989, с.106-112.
3. A.Nouri-Borujerdi. Performance characteristics of a long heat pipe // *Proc. VI Minsk International Seminar «Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators»*. 12-15 September 2005, Belarus, Minsk, p. 293-299.
4. G.A. Krivonosov, I.N. Onishenko, V.I. Volkov, Modified Evaporating thermosiphon // *Ibid*, p.198-201.

*Статья поступила в редакцию 05.07.2010 г.*

## RELAXATION OSCILLATIONS IN HEAT PIPES

*G.A. Krivonosov, I.N. Onishchenko*

Unlike existing models the operation of heat pipes (TT), using ap-tion of laminar flow of steam from the evaporator to the condenser [1-3], the model of the relaxation re-work bench press in TT . Experiments in which such a regime is observed. Submitted's mathematical model of this regime and a description of the functioning of the TT in this mode. The possible advantages of the relaxation regime is realized modifying heat pipe, use-forming relaxation mode and shows its great effectiveness.

## РЕЛАКСАЦІЙНІ КОЛИВАННЯ У ТЕПЛОВИХ ТРУБАХ

*Г.А. Кривонов, І.М. Оніщенко*

На відміну від існуючих моделей функціонування теплових труб (ТТ), що використовують наближення ламінарного потоку пари від випарника до конденсатора [1-3], розглянуто модель релаксаційного режиму роботи в ТТ. Проведено експерименти, в яких такий режим спостерігається. Представлено математична модель цього режиму та наведено опис функціонування ТТ в такому режимі. Визначено можливі гідності релаксаційного режиму, реалізовано модифікована теплова труба, що використовує релаксаційний режим, і показана її велика ефективність.