

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПУСКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИОННОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

А. NAUMOVA

## RESEARCH OF PULSATING HEAT PIPE STARTING CHARACTERISTICS

**Аннотація.** Наведені результати досліджень пускових режимів пульсаційної теплової труби залежно від підведеної теплової потужності. Показано, що при підведенні високих потужностей, величина яких перевищує значення перехідного теплового потоку, пульсаційна теплова труба набагато швидше виходить на стаціонарний режим, ніж при підведенні малих теплових потоків. Криза тепловіддачі для високих теплових потужностей настає раніше, ніж для малих. Отримані результати порівняні з літературними даними. Зроблений висновок про те, що пускові характеристики пульсаційної теплової труби значною мірою залежать від способу охолодження зони конденсації та геометрії пристрою.

**Ключові слова:** теплові труби, теплові потоки, тепловіддача.

**Аннотация.** Приведены результаты исследований пусковых режимов пульсационной тепловой трубы в зависимости от подведенной тепловой мощности. Показано, что при подводе высоких мощностей, величина которых превышает значение переходного теплового потока, пульсационная тепловая труба значительно быстрее выходит на стационарный режим, чем при подводе малых тепловых потоков. Кризис теплоотдачи для высоких пусковых мощностей наступает раньше, чем для малых. Полученные результаты сравнены с данными из литературы. Сделан вывод о том, что пусковые характеристики пульсационной тепловой трубы в значительной мере зависят от способа охлаждения зоны конденсации и геометрии устройства.

**Ключевые слова:** тепловая труба, тепловые потоки, теплоотдача.

**Annotation.** Given article presents experimental results of pulsating heat pipe starting mode depending on input heat flux. It is shown that under high input heat fluxes exceeding the value of transient one pulsating heat pipe reaches steady-state conditions much more quickly in comparison with low input heat fluxes. For high input heat fluxes heat transfer crisis starts earlier than for low ones. The obtained results were compared with data from the literature. The conclusion was made that pulsating heat pipe starting characteristics are greatly influenced by the way of cooling of condensing zone and by device geometrics.

**Key words:** heat pipe, heat flow, heat transfer.

### Введение

С развитием электронных технологий и компьютерной отрасли все большее внимание уделяется проблеме охлаждения теплонагруженных элементов. Эта задача также осложняется маленькими размерами и труднодоступным расположением охлаждаемых объектов. С поставленными требованиями с успехом справляются такие теплопередающие устройства как пульсационные тепловые трубы (ПТТ), которые наряду с простотой и дешевизной изготовления обладают малыми размерами (с внутренним диаметром менее 5мм для воды в качестве теплоносителя) и значительным теплопередающим потенциалом [1]. Результаты исследований [2] показывают, что термические сопротивления ПТТ могут достигать величины 0,05 К/Вт, что говорит о перспективном будущем для такого типа теплопередающих устройств.

### Объект исследования и методика проведения экспериментов

Пульсационные тепловые трубы, установленные на реальном тепловыделяющем элементе, могут подвергаться влиянию как малых (порядка нескольких десятков Ватт), так и больших (несколько сотен Ватт) значений тепловых потоков. С целью исследования теплопередающих характеристик ПТТ были проведены эксперименты в условиях резкого возрастания подведенного теплового потока. Исследуемый образец ПТТ представлял собой медный капилляр с внутренним

діаметром  $d_{\text{ВН}} = 1\text{ мм}$ , и наружным діаметром  $d_{\text{НАР}} = 2\text{ мм}$ , согнутый в виде S-подобного змеевика с 7-ю петлями [3]. Теплоносителем служила вода, коэффициент заполнения составлял 50% от внутреннего объема ПТТ. Экспериментальная установка была аналогичной приведенной в [4].

К зоне нагрева ПТТ после установления постоянной температуры  $t_{\text{ОХЛ}} = 20^\circ\text{C}$  и расхода  $G = 1,734 \cdot 10^{-3}\text{ кг/с}$  охлаждающей жидкости подводились:

- малая пусковая мощность  $Q_M = 10\text{ Вт}$ , с дальнейшим набросом нагрузки 10 Вт;
- большие пусковые мощности  $Q_{B1} = 100\text{ Вт}$  и  $Q_{B2} = 200\text{ Вт}$ . Далее подведенный тепловой поток изменялся с шагом 100 Вт.

**Результаты исследований**

В результате проведенных испытаний были получены температурные поля по зонам ПТТ во времени (рис. 1).

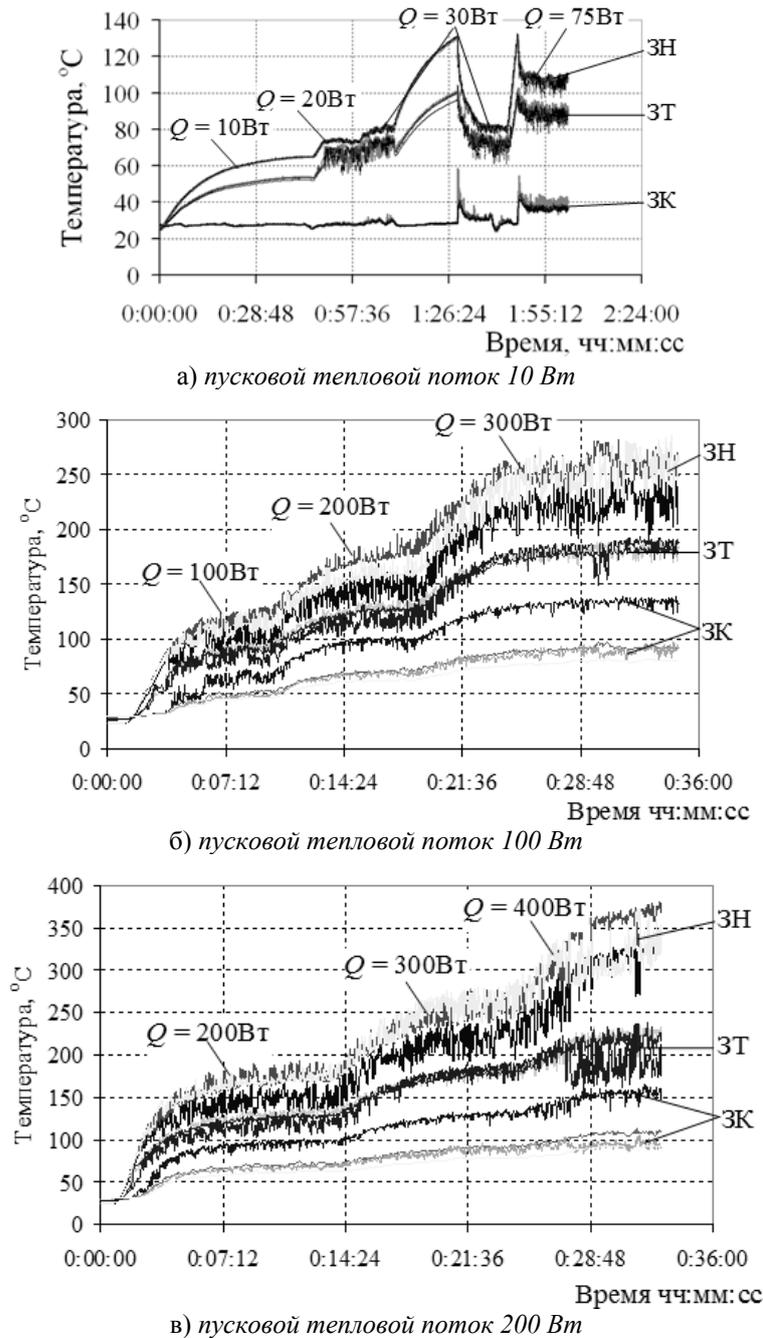


Рис. 1. Температурные поля по зонам ПТТ (время показано от начала эксперимента):  
 ЗН – зона нагрева; ЗТ – зона транспорта; ЗК – зона конденсации

Уровень пусковых нагрузок в случаях подвода  $Q_{Б1}$  и  $Q_{Б2}$  значительно превышал величину переходного теплового потока, когда «включается» пульсационный механизм переноса тепла [4]. Подводимый тепловой поток аккумулируется в зоне нагрева и способствует зарождению, росту и отрыву парового пузыря. Если величина подводимого теплового потока недостаточна, то часть теплоты переносится в зону нагрева за счет теплопроводности стенки, не давая пузырю достичь отрывного диаметра. Как только тепловой поток достигает так называемого «переходного» значения, паровой пузырек отрывается и движется в зону конденсации, попутно увлекая за собой весь парожидкостный состав теплоносителя. Величина переходного теплового потока характеризует переход от конвективного режима теплопередачи (за счет конвекции теплоносителя и теплопроводности стенки) к пульсационному, обусловленному кипением и пульсационным движением теплоносителя. По истечении некоторого времени, необходимого для зарождения и роста парового пузырька до размеров, достаточных для отрыва от поверхности стенки, сразу устанавливается стационарный режим. Это очень удобно с точки зрения эффективности охлаждения, поскольку время выхода на стационарный режим при одномоментном подводе  $Q_{Б1}$  и  $Q_{Б2}$  очень мал и составляет порядка пяти минут вместо пятидесяти по сравнению с временем выхода на режим при подводе  $Q_M$ . К тому же почти мгновенное установление оптимального пульсационного режима теплопередачи позволяет быстро оценивать температурные характеристики охлаждаемого объекта.

При подводе  $Q_{Б1}$  уровень температур в зонах нагрева, транспорта и конденсации ПТТ несколько отличается по сравнению с постепенным подводом  $Q_M$  (рис. 2).

Как следует из рис. 2, при подводе высокого теплового потока  $Q_{Б1}=100$  Вт и установлении П пульсационного режима средний уровень температур во всех зонах ПТТ выше, чем при набросе малой тепловой нагрузки  $Q_M=10$  Вт. Это можно отчасти пояснить тем, что при подводе  $Q_M=10$  Вт ПТТ (по крайней мере, в данном экспериментальном исследовании) проработала больше времени, следовательно, постепенно выходя на стационарный уровень температур, могла лучше охладиться. При подводе высоких тепловых потоков  $Q_{Б1}$  и  $Q_{Б2}$  весь процесс выхода на стационарный режим занимает значительно меньше времени.

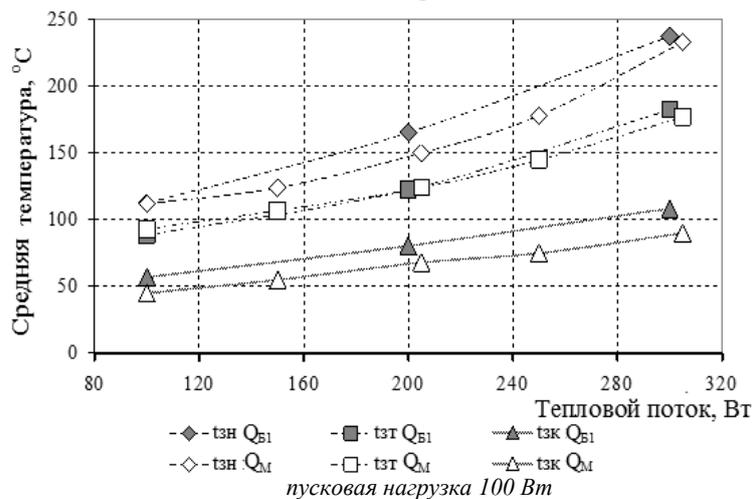


Рис. 2. Сравнение средних температур при подводе  $Q_{Б1}=100$  Вт и  $Q_M=10$  Вт:

$t_{3H}$  – температура в зоне нагрева;

$t_{3T}$  – температура в зоне транспорта;  $t_{3K}$  – температура в зоне конденсации

Способ запуска ПТТ также влияет на частоту температурных колебаний (рис. 3).

Как следует из рис. 3, подвод  $Q_{Б1}=100$  Вт способствует тому, что частота колебаний в зонах нагрева, транспорта и конденсации ПТТ увеличивается. Это может говорить о том, что возрастает частота отрыва паровых пузырей, и поток парожидкостной смеси теплоносителя движется интенсивнее. Этим также можно объяснить более высокий средний температурный уровень в зонах ПТТ при подводе высоких тепловых потоков. Поскольку при подводе  $Q_M=10$  Вт частота пульсаций меньше, то логично предположить, что скорость движения теплоносителя также ниже. Поэтому нагретая парожидкостная смесь, проходя через зону конденсации, успевает отдать большее количество теплоты, а, следовательно, далее в зону нагрева подаётся уже менее нагретый теплоноситель. При высоких пусковых нагрузках теплоноситель двигается быстрее, поэтому в зоне конденсации охлаждается меньше. В результате это отражается на общем уровне температур,

среднее значение которых для высоких пусковых нагрузок несколько выше.

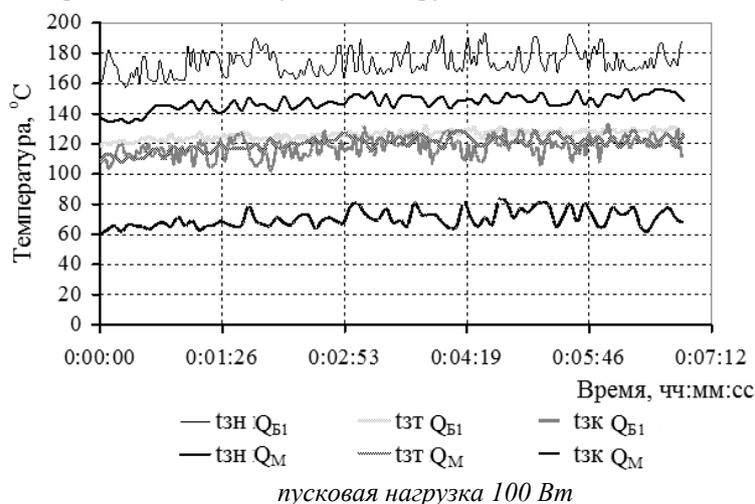


Рис. 3. Амплитуды колебаний температур при подводе  $Q_{Б1}=100$  Вт и  $Q_M=10$  Вт:

- $t_{3Н}$  – температура в зоне нагрева;
- $t_{3Т}$  – температура в зоне транспорта;
- $t_{3К}$  – температура в зоне конденсации

При подводе высоких тепловых потоков существуют некоторые недостатки. Например, то, что критический тепловой поток (для установленной начальной пусковой мощности  $Q_{Б2}=200$  Вт) был достигнут уже при 400 Вт, тогда как при таких же условиях проведения эксперимента, но постепенном подводе малых тепловых потоков, это значение составляло примерно 460 Вт. На рис.4 представлена зависимость температуры в зоне нагрева в зависимости от подводимой тепловой мощности в режиме реального времени.

Поступательное возрастание температуры в зоне нагрева, а со временем и в других зонах ПТТ, на рис. 4 (штрих-пунктиром обозначена усредненная температура одной из термопар в зоне нагрева) свидетельствует о пересыхании, или вернее – запаривании теплоносителя в зоне нагрева и начале кризисных явлений.

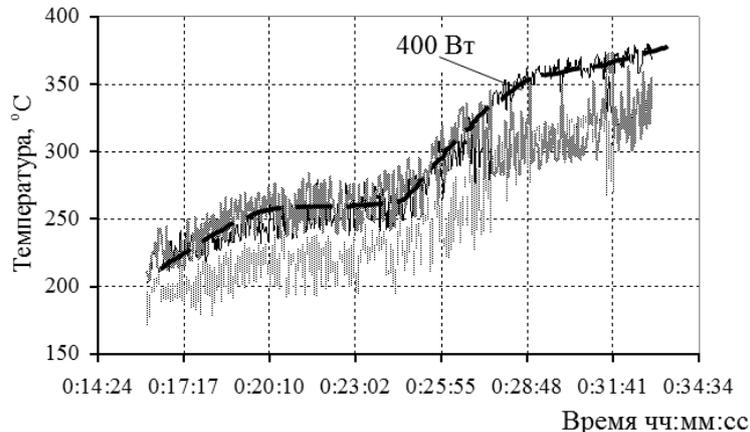


Рис. 4. Кризисные явления в ПТТ при подводе  $Q_{Б2}=200$  Вт

При тепловых нагрузках ПТТ, близких к критическим, пульсации теплоносителя несколько затухают. Это можно объяснить следующим образом. После заполнения ПТТ теплоносителем и его равномерного распределения по всему внутреннему объему подводится тепловой поток, который способствует зарождению, росту и отрыву пузырей и, как следствие, движению парожидкостной смеси теплоносителя. Сначала это движение носит непостоянный характер, возникновение новых паровых пузырей в зоне нагрева может не только затормаживать движущийся поток теплоносителя, но и останавливать, и даже приводить к его движению в обратном направлении. Этот процесс происходит хаотически и самопроизвольно, он не поддается логическому описанию. С ростом величины передаваемого теплового потока направление движения стабилизируется, а новые возникающие пузыри просто уносятся в уже установившемся

направлении. Такой режим движения теплоносителя, по сути, аналогичен снарядному, когда пузыри газа или пара чередуются с жидкостью. При дальнейшем увеличении теплового потока режим движения теплоносителя переходит от снарядного к кольцевому (рис. 5).

Для теплоотдачи кольцевой режим течения теплоносителя является оптимальным. При дальнейшем росте тепловых нагрузок в зоне нагрева начинается пересыхание этой тонкой пленки теплоносителя у стенки. По большому счету, такой тип теплопередающего устройства уже не является пульсационной тепловой трубой в общепринятом смысле, поскольку кольцевой режим не способствует наличию каких бы то ни было пульсаций теплоносителя. Во временном отношении процесс перехода к кольцевому режиму движения теплоносителя и кризисным явлениям происходит довольно быстро. Можно предположить, что переход к кольцевому режиму в чистом виде имеет место практически непосредственно перед началом кризиса теплоотдачи.

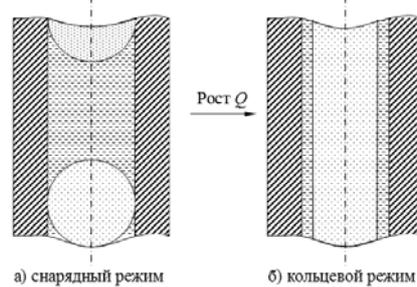


Рис. 5. Переход от снарядного режима течения теплоносителя к кольцевому

Сравнение с данными других авторов показало некоторые различия в полученных результатах. Так, для ПТТ из [5] (внутренний диаметр  $d_{вн}=2$ мм, коэффициент заполнения 50%, материал стенки – медь, теплоноситель – вода, 8 петель) при подводе теплового потока 100 Вт стационарный режим наступает через 35...40 минут, а максимальная температура в зоне нагрева не превышает  $85^{\circ}\text{C}$ . Тогда как исследуемая ПТТ при подводе  $Q_{Б1}=100$  Вт выходила на режим в течение 6...7 минут, а максимальная температура в зоне нагрева составляла около  $125^{\circ}\text{C}$ . Такие различия можно объяснить следующим образом. Более быстрый выход на стационарный режим обусловлен тем, что в проведенном исследовании охлаждение осуществлялось путем вынужденной конвекции жидкости, а в [5] – за счет естественной конвекции воздуха. На уровень температур ПТТ после выхода на стационарный режим значительное влияние оказывает размер внутреннего диаметра, который непосредственно связан с величиной капиллярных сил, действующих на теплоноситель.

### Выводы

1. Исследование влияния пусковых нагрузок на теплопередачу в ПТТ показало, что подвод высоких тепловых потоков, значение которых превышает величину переходного теплового потока (для исследуемой ПТТ – около 40...50 Вт), является предпочтительнее, чем постепенный наброс небольших нагрузок.
2. Одновременный подвод  $Q_{Б1} = 100$  Вт и  $Q_{Б2} = 200$  Вт позволяет избежать первого режима теплопередачи за счет теплопроводности стенки и сопутствующих ему более высоких температур в зонах нагрева, транспорта и конденсации ПТТ. Несмотря на более низкий уровень критического теплового потока, ПТТ под действием больших пусковых нагрузок намного быстрее выходят на стационарный режим.
3. Сравнение с данными других авторов показало, что различия в методике проведения эксперимента и геометрия ПТТ оказывают решающее влияние на результаты. Так, время выхода ПТТ на стационарный режим сильно зависит от способа охлаждения зоны конденсации, а общее значение температуры ПТТ после выхода на стационарный режим – от величины внутреннего диаметра трубки.

### Литература

1. Yang Honghai, Khandekar S., Groll M. Operational limit of closed loop pulsating heat pipes // Applied Thermal Engineering.– 2008. – № 28.– P.49–59.
2. Borisov V., Buz. V., Coba A. etc. Modeling and Experimentation of Pulsating Heat Pipes // 12th Int. Heat Pipe Conf., pp. 214-219, Moscow, 2002.
3. Наумова А.Н., Кравец В.Ю. Технологические аспекты изготовления плоской пульсационной тепловой трубы // Збірник наукових праць СНУЧЕтаП.– 2009.– №1 (29).– С. 120–127.

4. Кравец В. Ю., Наумова А. Н., Вовкогон А.Н. Исследование режимов теплообмена в пульсационной тепловой трубе // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 1(85). – С. 39-43.
5. Дмитрин В.И., Майданик Ю.Ф. Экспериментальные исследования замкнутой осциллирующей тепловой трубы // Теплофизика высоких температур. – 2007. – Том 45, №5. – С. 772-776.